

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกัน  
โดยใช้ท่อที่มีรอยบุ๋ม

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A DOUBLE TUBE  
HEAT EXCHANGER USING DIMPLED TUBE

ยุกธนา ศรีพา  
YUTTHANA SRIPA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-030-432

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกัน  
โดยใช้ท่อที่มีรอยบุ๋ม

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A DOUBLE TUBE  
HEAT EXCHANGER USING DIMPLED TUBE

ยุทธนา ศรีผา

YUTTHANA SRIPA

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 87124  
วัน,เดือน,ปี..... 30 ส.ค. 2552

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-030-432

**HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A DOUBLE TUBE  
HEAT EXCHANGER USING DIMPLED TUBE**

**YUTTHANA SRIPA**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2008**

**KMITL-2008-EN-M-030-432**

**COPYRIGHT 2008**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกันโดยใช้ท่อที่มีรอยบุ๋ม
นักศึกษา	นายยุทธนา ศรีผา
รหัสประจำตัว	47060306
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2551
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ชินรัชย์ เขียรพงษ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของอัตราการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนจุดศูนย์กลางร่วม ที่ทำการสร้างรอยบุ๋มที่ผิวท่อชั้นในร่วมกับสอคใส่ไบบิตเต็ม ทดลองในรูปแบบการไหลสวนทางกัน ระหว่างน้ำร้อนและน้ำเย็นที่ไหลในท่อชั้นในและชั้นวงแหวนตามลำดับ กำหนดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางเข้า  $70 \pm 0.5$  °C และอุณหภูมิน้ำเย็น  $30 \pm 1$  °C ทำการทดลองโดยจัดวางตำแหน่งรอยบุ๋มมีอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 2 แบบคือ 0.7 และ 1 ทั้งในแนวตรงและแนวสลับ ส่วนไบบิตเต็มที่ใช้ในการทดลองมีอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความกว้างไบบิต 3 แบบคือ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ กำหนดอัตราการไหลของน้ำเย็นที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 10,000 และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำร้อนในช่วงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ระหว่าง 10,000 ถึง 45,000 ผลการศึกษาการเพิ่มถ่ายเทความร้อนและผลกระทบจากความเสียดทาน พบว่าเทคนิคการสร้างรอยบุ๋มที่ผิวท่อชั้นในร่วมกับสอคใส่ไบบิตเต็ม สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุด 219 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่า ขณะเดียวกันก็มีผลทำให้การสูญเสียจากความเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นกัน

**Thesis Title** Heat Transfer Enhancement in a Double Tube Heat Exchanger using Dimpled Tube

**Student** Mr.Yutthana Sripa

**Student ID.** 47060306

**Degree** Master of Engineering

**Program** Mechanical Engineering

**Year** 2008

**Thesis Advisor** Assoc.Prof.Dr. Chinaruk Thianpong

### ABSTRACT

The effect of heat transfer rates and frictions loss of a counter flow double pipe heat exchanger were experimentally investigated by using dimpled inner tubes with twisted tape insert. Dimpled inner tubes, having different ratio of pitch to pipe diameter of dimples at 0.7 and 1, were used in straight and stagger arrangement. Twisted tape, having different ratio of pitch to tape width at 3, 5 and 7, were used. Hot and cold water were flowed through the inner tube and annulus respectively. Temperature of hot water at  $70\pm 0.5$  °C and  $30\pm 1$  °C of cold water were used in this study. Flow rate in the annulus was fixed at Reynolds number of 10,000 whereas flow rate in the inner tube was varied in the range of Reynolds number between 10,000 to 45,000. The experimental results showed that the heat transfer rates were increased by using dimpled inner tubes with twisted tape insert. The maximum heat transfer increasing is 219 % in comparison with the plain tube. However, dimple and twisted tape caused some increasing in flow frictions loss.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำสั่งสอน, ให้คำแนะนำ, ให้คำปรึกษา และความกรุณาของ รศ.ดร.ชินรักษ์ เขียวพงษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา รวมทั้ง รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งใจในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ลูกศิษย์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่เลี้ยงดู และอบรมสั่งสอนเป็นอย่างดี ให้ลูกได้มีโอกาสในการศึกษาร่ำเรียนมาจนถึงทุกวันนี้

ขอขอบคุณ คุณวิวัฒน์ หนูเหมือน นักศึกษาปริญญาโท ที่ร่วมกันออกแบบและสร้างชุดทดลองมาด้วยกัน และให้คำแนะนำช่วยเหลือผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บริษัท แอ็คมี อินเทอร์เน็ตเซ็นแนล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนผู้วิจัย

ขอขอบคุณ รุ่นพี่และรุ่นน้อง นักศึกษาปริญญาโท ที่ได้ช่วยเหลือให้คำแนะนำตลอดที่ทำการวิจัย และขอขอบคุณคุณอุษามะ ตีลี และคุณธนภฤษ พันธุ์บุตร นักศึกษาปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยกันการสร้างชุดทดลองจนสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนสำหรับการวิจัย

สุดท้ายนี้ หากแต่คุณค่าใด ๆ อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ยุทธนา ศรีผา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.6 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.2.1 งานวิจัย Cengiz Yildiz, Yasar Biger และ DursunPehlivan.....	7
2.2.2 งานวิจัย Agarwal และ Rao.....	7
2.2.3 งานวิจัย Ebru Kavak Akpinar, Yasar Bicer, Cengiz Yildiz, และ Dursun Pehlivan.....	7
2.2.4 งานวิจัย วิชาญ คงเกียรติไพบุลย์ วราคม เนติน้อย ปรัชญา สำรวยศิลป์ สมศักดิ์ เพ็ชรกุล และ สมิทธ์ เอี่ยมสะอาด.....	8
2.2.5 งานวิจัย Saha, Dutla และ Dhal.....	8
2.2.6 งานวิจัย P. Promvong และ S. Eiamsa-ard.....	9
2.2.7 งานวิจัย S.Ray และ AW.Date.....	10
2.2.8 งานวิจัย Juin Chen , Hans Muller-Steinhagen และ Geoffrey G. Dufy.....	10

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	12
3.1 การถ่ายเทความร้อน.....	12
3.1.1 การนำความร้อน (Conduction).....	12
3.1.2 การพาความร้อน (Convection).....	13
3.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation).....	15
3.2 การไหลภายในท่อ.....	15
3.2.1 ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number).....	16
3.3 การสูญเสียภายในท่อ.....	16
3.3.1 การสูญเสียหลัก.....	16
3.3.2 การสูญเสียรอง.....	17
3.4 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน.....	18
3.4.1 วิธีแบบ Active.....	18
3.4.2 วิธีแบบ Passive.....	18
3.5 การถ่ายเทความร้อนภายในท่อ.....	18
3.5.1 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number).....	18
3.5.2 การถ่ายเทความร้อนภายในท่อผิวเรียบ.....	19
3.5.3 การวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกรณีผิวไม่เรียบ	
ด้วยวิธีการ Wilson plot Method.....	20
3.6 การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกัน โดยวิธีความแตกต่าง	
อุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (LMTD).....	22
3.7 ประสิทธิภาพของการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน.....	24
บทที่ 4 อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง.....	26
4.1 บทนำ.....	26
4.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	30
4.2.1 กำลังของเครื่องทำความร้อน.....	30
4.2.2 กำลังของเครื่องสูบลม.....	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล.....	31
4.2.4 อุปกรณ์วัดความดัน.....	31
4.2.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	32
4.2.6 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล.....	33
4.3 การทดลอง.....	34
4.3.1 การเตรียมการทดลอง.....	34
4.3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	35
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	36
5.1 กรณีท่อเปล่าผิวเรียบ.....	36
5.2 กรณีท่อที่มีรอยนูน.....	38
5.3 กรณีท่อเปล่ากับการใส่ใบบิด $Y=3, 5, 7$ .....	42
5.4 กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรงร่วมกับการใส่ใบบิด $Y=3, 5, 7$ .....	46
5.4.1 กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรง $S = 0.7$ ร่วมกับการใส่ใบบิด .....	46
5.4.2 กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรง $S = 1.0$ ร่วมกับการใส่ใบบิด .....	51
5.4.3 สรุปความสัมพันธ์กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรงร่วมกับการใส่ใบบิด .....	55
5.5 กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวสลับร่วมกับการใส่ใบบิด .....	58
5.5.1 กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวสลับ $Z = 0.7$ ร่วมกับการใส่ใบบิด .....	58
5.5.2 กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวสลับ $Z = 1.0$ ร่วมกับการใส่ใบบิด .....	62
5.5.3 สรุปความสัมพันธ์กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวสลับร่วมกับการใส่ใบบิด.....	67
5.6 สหพันธ์ระหว่าง $Nu$ และ $f$ กับ ระยะรอยนูน ( $S$ และ $Z$ ) และอัตราบิดตัวใบบิด( $Y$ ).....	70
5.6.1 กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรงร่วมกับการใส่ใบบิด .....	70
5.6.2 กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวสลับร่วมกับการใส่ใบบิด .....	71
5.6.3 ความคลาดเคลื่อนจากสมการสหพันธ์.....	72
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	74
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	75

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม .....	76
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก.....	79
ภาคผนวก ข.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	93

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงภาพลักษณะการไหลภายในท่อผิวเรียบ.....	2
1.2 แสดงภาพลักษณะการไหลภายในท่อที่มีรอยขรุขระ.....	2
1.3 แสดงภาพลักษณะการไหลภายในท่อที่ใส่ไบบิต.....	3
1.4 แสดงภาพลักษณะการไหลภายในท่อที่มีรอยขรุขระร่วมกับใส่ไบบิต.....	3
1.5 แสดงภาพสนามการไหลที่ทำนายด้วย RMS [15] .....	5
2.1 แสดงภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อซ้อนที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวน....	8
2.2 แสดงภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อซ้อนที่ติดตั้งแผ่นบิตในท่อชั้นใน.....	9
2.3 แสดงภาพทดสอบโดยการใส่กรวยวงแหวนพร้อมกับการใส่ไบบิตต่อ.....	10
2.4 แสดงภาพทดสอบที่สร้างผิวรอยขรุขระ.....	11
3.1 การหา $h_0$ โดยวิธีการ Wilson-plot Method .....	21
3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนและรูปร่างของอนุกรมสำหรับการไหลสวนทางกัน.....	22
4.1 ส่วนทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนและการวางแนวรอยขรุขระ.....	26
4.2 แสดงภาพท่อทองแดงที่ทำการสร้างผิวรอยขรุขระ.....	27
4.3 แสดงภาพท่อทองแดงที่มีผิวรอยขรุขระแนวตรง.....	27
4.4 แสดงภาพท่อทองแดงที่มีผิวรอยขรุขระแนวสลับ.....	27
4.5 แสดงภาพไบบิตอลูมิเนียมแผ่นบาง.....	28
4.6 แสดงภาพไบบิตอลูมิเนียมแผ่นบาง $y = 3$ .....	28
4.7 แสดงภาพไบบิตอลูมิเนียมแผ่นบาง $y = 5$ .....	28
4.8 แสดงภาพไบบิตอลูมิเนียมแผ่นบาง $y = 7$ .....	28
4.9 แสดงภาพชุดทดลอง.....	29
4.10 แสดงแผนภาพของชุดทดลอง.....	29
4.11 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลโรตารี.....	31
4.12 อุปกรณ์วัดความดัน U-Tube มาโนมิเตอร์.....	32
4.13 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ RTD Pt 100.....	33
4.14 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ RTD Pt และการสอบเทียบ.....	33
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re สำหรับท่อเปล่าผิวเรียบ.....	37
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ f สำหรับท่อเปล่าผิวเรียบ.....	37
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu กรณีท่อที่มีรอยขรุขระ.....	39



## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ $\eta$ กรณีท่อร้อยนํ้า $Z = 0.7$ ร่วมกับการใส่ไบบิต.....	61
5.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu กรณีท่อร้อยนํ้า $Z = 1.0$ ร่วมกับการใส่ไบบิต.....	64
5.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ $Nu/Nu_0$ กรณีท่อร้อยนํ้า $Z = 1.0$ ร่วมกับการใส่ไบบิต.....	64
5.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ $f$ กรณีท่อร้อยนํ้า $Z = 1.0$ ร่วมกับการใส่ไบบิต.....	65
5.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ $f/f_0$ กรณีท่อร้อยนํ้า $Z = 1.0$ ร่วมกับการใส่ไบบิต.....	65
5.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ $\eta$ กรณีท่อร้อยนํ้า $Z = 1.0$ ร่วมกับการใส่ไบบิต.....	66
5.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu กรณีท่อร้อยนํ้าแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต.....	67
5.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ $Nu/Nu_0$ กรณีท่อร้อยนํ้าแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต.....	67
5.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ $f$ กรณีท่อร้อยนํ้าแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต.....	68
5.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ $f/f_0$ กรณีท่อร้อยนํ้าแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต.....	68
5.42 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ $\eta$ กรณีท่อร้อยนํ้าแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต.....	69
5.43 แสดงความคลาดเคลื่อนสหพันธ์ Nu กรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิต.....	72
5.44 แสดงความคลาดเคลื่อนสหพันธ์ $f$ กรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิต.....	72
5.45 แสดงความคลาดเคลื่อนสหพันธ์ Nu กรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต.....	73
5.46 แสดงความคลาดเคลื่อนสหพันธ์ $f$ กรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต.....	73

# สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ค่าสภาพการนำความร้อน (ที่อุณหภูมิ 300K).....	13
3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย.....	14
3.3 ค่าความขรุขระสัมบูรณ์ของท่อ.....	17

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เป็นอุปกรณ์ใช้พลังงานที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่นในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเกษตร อุตสาหกรรมเคมี อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะมีความสำคัญในกระบวนการให้ความร้อน และการระบายความร้อนในกระบวนการผลิต และหนึ่งตัวแปรสำคัญที่จะช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิต ก็คือการเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากสถานการณ์ปัญหาด้านพลังงานของประเทศไทยในปัจจุบัน ซึ่งทำให้การปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ในอดีตจนถึงปัจจุบันผู้ผลิตพยายาม ที่จะออกแบบและปรับปรุงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถใช้ประโยชน์ได้สูงสุด เพื่อที่จะสามารถลดขนาดอุปกรณ์ เพื่อลดพื้นที่การใช้งานและต้นทุนการผลิตพร้อมทั้งลดการใช้พลังงาน โดยหัวใจสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือการทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เช่นการใช้เทคนิคต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนในการไหลซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น โดยมีวิธีการหลัก 2 วิธี ที่สำคัญ เพื่อบรรลุเป้าหมายดังกล่าว วิธีการแรกคือ active methods คือ การเพิ่มการส่งถ่ายความร้อน โดยการเพิ่มพลังงานจากแหล่งภายนอกให้ของไหล วิธีที่สองเป็นวิธีการแบบ passive methods คือ การใช้ประโยชน์จากการไหลเองโดยไม่ต้องใช้พลังงานจากแหล่งภายนอก

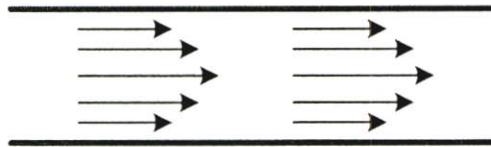
สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อซ้อน มีวิธีการที่หลากหลาย เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนในการไหล เช่น นิติเวช ทองนุช (2548) โดยการสอดใส่ใบบิดแบบต่าง ๆ ในท่อชั้นใน สมศักดิ์ เพ็ชรกุล (2550) โดยการสอดใส่ Louvered Strips ในท่อชั้นใน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการแบบ passive methods เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนการไหลในท่อชั้นใน และงานวิจัยฉบับนี้ ได้ใช้เทคนิควิธีการสร้างรอยนูนที่ผิวท่อชั้นใน ซึ่งจะเป็นการรบกวนการไหลเพื่อเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลรอบ ๆ ผิวท่อชั้นใน ร่วมกับเทคนิคการใส่ใบบิดเต็ม ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนและหน่วงการไหลจากการไหลหมุนวนแบบต่อเนื่องตลอดช่วงการไหล ซึ่งจากลักษณะวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันของทั้งสองเทคนิคดังกล่าว จึงเป็นที่มาของแนวความคิดงานวิจัยและการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และผลจากความเสียหาย จากการนำเทคนิคทั้งสองมาใช้ควบคู่กัน

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยฉบับนี้มีความมุ่งหวังเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน รูปแบบการไหลสวนทางกัน โดยการทำให้ผิวท่อชั้นในให้เป็นรอยนูนที่ระยะแตกต่างกัน ทั้งการวางรอยนูนแนวตรงและแนวสลับ ร่วมกับการใส่ไบบิตเด็มที่ระยะพิทช์แตกต่างกัน

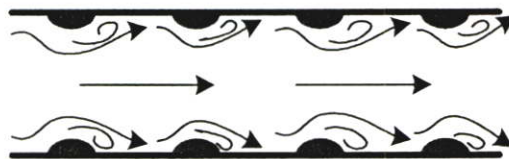
## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนในงานวิจัยนี้ มีสมมติฐานการศึกษาจากหลักการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ โดยรูปแบบลักษณะการไหลภายในท่อผิวเรียบ(รูปที่ 1.1) รอบ ๆ ผิวท่อจะเกิดขึ้นชั้นขีดผิวความร้อน (thermal boundary layer) ซึ่งเป็นชั้นต้านทานความร้อน วิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจะต้องทำลายหรือลดความหนาชั้นขีดผิวดังกล่าวให้บางลง ซึ่งมีสมมติฐานการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยท่อรอยนูนดังนี้



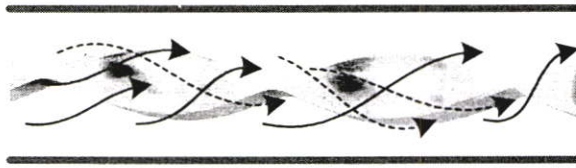
รูปที่ 1.1 แสดงภาพลักษณะการไหลภายในท่อผิวเรียบ

การไหลผ่านท่อที่ทำการสร้างผิวให้มีรอยนูน จะทำให้แนวการไหลรอบ ๆ ผิวท่อถูกบังคับให้ไหลกระทบผิวรอยนูน ทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนรอบ ๆ ผิวท่อเพิ่มขึ้น (รูปที่ 1.2) ทำให้ชั้นขีดผิวความร้อน (thermal boundary layer) บางลง ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสกับของไหลดีขึ้น แต่ทั้งนี้การรบกวนการไหลจากรอยนูนจะทำให้การเสียดทานการไหลเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 1.2 แสดงภาพลักษณะการไหลภายในท่อที่มีรอยนูน

นอกจากวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการทำให้ชั้นขีดผิวความร้อน (thermal boundary layer) ให้บางลงจากการสร้างฝอยรอยขุ่นแล้ว การใส่ไบบิตภายในท่อเป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้น จากรูปที่ 1.3 แสดงลักษณะการไหลผ่านท่อที่ใส่ไบบิตในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ของไหลจะถูกบังคับให้เกิดกระแสการไหลหมุนวนตามแนวไบบิต เกิดการหมุนวนการไหลและเพิ่มการปั่นป่วนให้กระแสการไหลในแนวท่อ เกิดการผสมของชั้นการไหล ทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น แต่การไหลผ่านไบบิตก็มีผลให้เพิ่มความเสียดทานเช่นกัน



รูปที่ 1.3 แสดงภาพลักษณะการไหลภายในท่อที่ใส่ไบบิต

ซึ่งจากหลักการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากการใช้ท่อรอยขุ่น และการใส่ไบบิตดังกล่าวข้างต้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนโดยท่อที่มีรอยขุ่นร่วมกับใส่ไบบิต สมมติฐานในการศึกษาดังที่แสดงในรูปที่ 1.4 การไหลผ่านท่อที่มีรอยขุ่นทำให้ชั้นขีดผิวความร้อนที่ผิวท่อบางลง ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวท่อสู่กระแสของไหลรอบผิวท่อดีขึ้น และจากการไหลผ่านไบบิต กระแสของไหลในแนวแกนท่อเกิดการไหลหมุนวนเพิ่มความปั่นป่วน และหน่วงเวลาการไหล ทำให้กระแสการไหลรอบผิวท่อคลุกเคล้าผสมกับกระแสการไหลหมุนวนในแนวแกนได้มากขึ้น เพิ่มการถ่ายเทความร้อนในชั้นการไหลจากนอกสุดรอบผิวท่อสู่ชั้นการไหลด้านในแนวแกนท่อ ทำให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่า การใช้ท่อที่มีรอยขุ่นโดยไม่มีไบบิตหรือการใส่ไบบิตในท่อเปล่าเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 1.4 แสดงภาพลักษณะการไหลภายในท่อที่มีรอยขุ่นร่วมกับใส่ไบบิต

จากสมมติฐานการศึกษาและจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง[3] และ [9] ความมุ่งหวังของงานวิจัยนี้คือ ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน  $\eta$  ในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

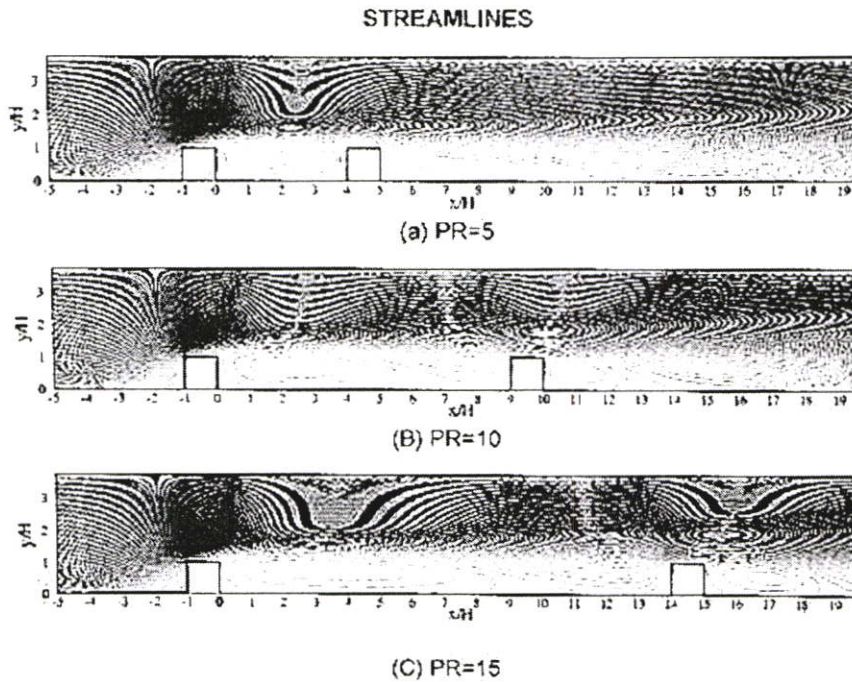
กรณีท่อที่มีรอยบุ่ม	$\eta$ มีค่ามากกว่า 1
กรณีท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบีด	$\eta$ มีค่าใกล้เคียง 1
กรณีท่อที่มีรอยบุ่มร่วมกับการใส่ไบบีด	$\eta$ มีค่ามากกว่า 1 และ $\eta$ มีค่ามากกว่า กรณีท่อที่มีรอยบุ่ม

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกัน โดยวิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (Log Mean Temperature Difference, LMTD) และการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธี Passive ซึ่งไม่ต้องอาศัยงานจากพลังงานภายนอก และใช้หลักการ Wilson Plot Method เพื่อศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อน จากการใช้ท่อเทคนิคที่มีลักษณะผิวไม่เรียบจากการสร้างรอยบุ่ม

แนวคิดการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน จากสมมติฐานการศึกษา โดยการทำให้ผิวท่อขรุขระจากรอยบุ่มเพื่อการไหลปั่นป่วนรอบผิวท่อ เป็นการลดความหนาชั้นขีดผิวความร้อน (thermal boundary layer) ร่วมกับการใส่ไบบีดเพื่อเพิ่มการไหลหมุนวนหน่วงการไหลรอบแนวศูนย์กลางท่อให้มากขึ้น จะเป็นการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น มากกว่าการใช้ท่อที่มีรอยบุ่มโดยไม่มีการใส่ไบบีดหรือการใส่ไบบีดในท่อเปล่าเพียงอย่างเดียว โดยหลักการออกแบบความลึกและระยะห่างรอยบุ่มเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ คำนึงถึงหลักการไหลข้ามสิ่งกีดขวางในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งต้องมีอัตราระยะพิทช์รอยบุ่ม(ระยะพิทช์ต่อความลึกรอยบุ่ม) ที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นของไหลที่ไหลข้ามรอยบุ่มแล้วตกกระทบผิวท่อก่อนถึงรอยบุ่มถัดไป(Reattachment) ซึ่งจากงานวิจัยของ P. Promvong, S. Eiamsa-ard และ S. Sripattanapipat [15] ที่ได้ทำการศึกษาการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนในช่องขนานที่มีครีป ด้วยวิธีการ finite volume โดยกำหนดเงื่อนไขอัตราระยะพิทช์(PR) 5, 10 และ 15 และตัวเลขเรโนลด์ที่ 42,000 ได้ผลการจำลองสนามการไหลด้วย Reynolds stresses model (RSM) ดังแสดงในรูป 1.5 พบว่าที่ PR เท่ากับ 10 และ 15 เกิดกระแสการไหลข้ามครีปและกระทบผิว (Reattachment) ซึ่งในงานวิจัยการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากการใช้ท่อรอยบุ่มนี้ จึงได้กำหนดอัตราระยะพิทช์รอยบุ่ม(PR) ที่จะทำการศึกษาให้อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน และพิจารณาถึงข้อจำกัดของคุณลักษณะของวัสดุที่นำมาสร้างชุดทดสอบร่วมด้วย โดยการวางรอยบุ่มทั้งในแนวตรงและแนวสลับที่ทำการทดสอบ จะมีอัตราระยะพิทช์รอย

บวม(PR) เท่ากับ 11 และ 8 ตามลำดับ และทำการทดลองในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่ช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ 10,000 ถึง 45,000



รูปที่ 1.5 แสดงภาพสนามการไหลที่ทำนายด้วย RMS [15]

### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกัน โดยใช้ท่อทองแดงมาตรฐาน 7/8 นิ้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 22.2 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 20.6 มิลลิเมตร เป็นท่อชั้นใน ส่วนท่อชั้นนอกเป็นท่อสเตนเลสมาตรฐาน 1 ½ นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกและภายใน 38 มิลลิเมตร และ 35 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความยาวส่วนทดสอบ 1.5 เมตร กำหนดน้ำร้อนอุณหภูมิ  $70 \pm 0.5$  °C และน้ำเย็นที่อุณหภูมิ  $30 \pm 1$  °C ไหลสวนทางกัน โดยน้ำร้อนไหลในท่อชั้นใน ส่วนน้ำเย็นไหลในท่อชั้นวงแหวน ทำการทดลองปรับอัตราการไหลน้ำร้อนในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ 10,000 ถึง 45,000 และน้ำเย็นอัตราไหลคงที่ตัวเลขเรย์โนลด์ 10,000 ใช้ท่อชั้นในที่มีรอยบวมที่อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อสำหรับการวางรอยบวมแนวตรง S เท่ากับ 0.7 และ 1 และอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อสำหรับการวางรอยบวมแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 และ 1 เช่นเดียวกัน ส่วนไบบิตเต็มที่ใช้ในการทดลองมีอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความกว้างไบบิต Y เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ

## 1.6 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย และพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน

บทที่ 4 กล่าวถึงอุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ในรูปแบบกราฟเพื่อแสดงให้เห็นผลการเปรียบเทียบในแต่ละกรณีที่ทำให้ทดลอง

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทรรศน์

### 2.1 บทนำ

สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อซ้อนนั้น มีวิธีการและเทคนิคที่หลากหลาย มีงานวิจัยที่น่าสนใจมากมายทั้งในและต่างประเทศ ที่นำเสนอด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพอสังเขปดังนี้

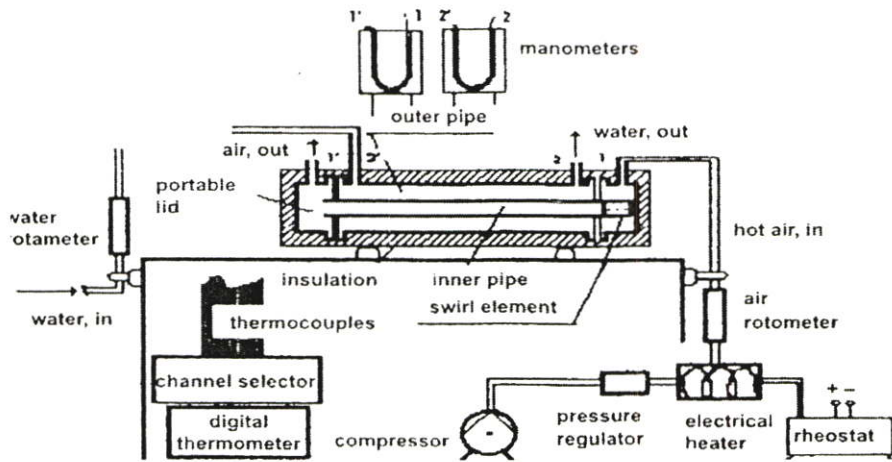
### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัย Cengiz Yildiz, Yasar Biger และ Dursun Pehlivan [7] ได้ศึกษาทดลองติดตั้งชุดใบพัด ชนิด 4 ใบ โดยร้อยเส้นลวดเป็นแนวทะลุจุดศูนย์กลางชุดใบพัด ทิศทางการหมุนใบพัดอิสระตามของไหลที่ตกกระทบ ทำการวางตำแหน่งชุดใบพัดห่างกันเป็นระยะตลอดแนวท่อชั้นในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นกว่า 250 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่ได้ทำการติดตั้งชุดใบพัดดังกล่าว แต่ผลกระทบจากความเสียดทานทำให้ความดันลดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น 500 ถึง 1000 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์และจำนวนชุดใบพัด

2.2.2 งานวิจัย Agarwal และ Rao [11] ได้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสำหรับของไหลหนืดในท่อกลมที่สอดใส่ใบบิดเอาไว้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย โดยใช้ Servotherm oil ร้อนและเย็นมีตัวเลขพรันด์ช่วง 195 ถึง 375 ไหลในท่อกลมค่าตัวเลขเรย์โนลด์ช่วง 70 ถึง 4,000 มีการใส่ใบบิด  $y$  เท่ากับ 2.41 ถึง 4.84 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น 3.13 ถึง 9.71 เท่าของท่อเปล่า ค่าตัวเลขนัสเซลท์ที่ได้ช่วง 2.28 ถึง 5.35 และ 1.21 ถึง 3.70 เท่าของท่อเปล่าที่อัตราการไหลและกำลังปั๊มคงที่ตามลำดับซึ่งวิธีการนี้ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้น

2.2.3 งานวิจัย Ebru Kavak Akpinar, Yasar Bicer, Cengiz Yildiz, และ Dursun Pehlivan [14] ได้ศึกษาผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน จากการติดตั้งชุดสร้างการไหลหมุนวนที่ทางเข้าของไหลท่อชั้นใน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อซ้อนจุดศูนย์กลางร่วม ใช้อากาศร้อนและน้ำเย็น ไหลในท่อชั้นในและท่อชั้นนวงแหวนตามลำดับ ทำการทดลองทั้งรูปแบบการไหลขนานกันและการไหลสวนทางกัน ที่ช่วงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ระหว่าง 7,500 ถึง 17,500 ซึ่ง

พบว่าค่าตัวเลขนัสเซลท์เพิ่มสูงขึ้นถึง 130 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนดังกล่าว แต่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานก็เพิ่มขึ้น 2.9 เท่า

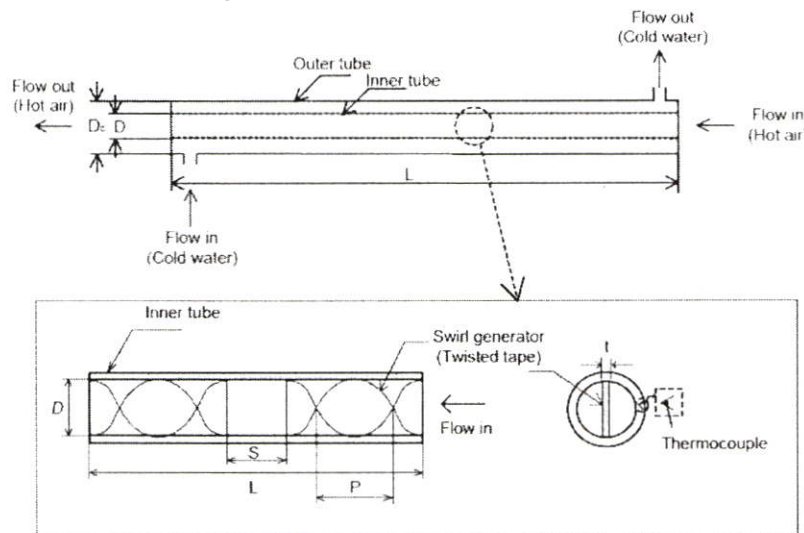


รูปที่ 2.1 แสดงภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อซ้อนที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวน

**2.2.4 งานวิจัย วิชาญ คงเกียรติไพบูลย์ วราคม เนติน้อย ปรัชญา สาร์วยศิลป์ สมศักดิ์ เพ็ชรกุล และ สมิทธ์ เอี่ยมสอาด [3]** ได้ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนสองชั้น การทดลองใช้น้ำเย็นไหลผ่านท่อชั้นนอกด้วยอัตราการไหลคงที่ ขณะที่อากาศร้อน จะไหลผ่านท่อชั้นใน ในลักษณะการไหลสวนทางกัน ทำการทดลองที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศร้อนอยู่ในช่วง 2000 ถึง 12000 และทำการติดตั้งแผ่นบิด ที่สร้างจากแผ่นเหล็กบาง 0.8 มิลลิเมตร โดยทำการบิดในมุม 180 องศาต่อหนึ่งระยะบิด ด้วยกัน 2 ช่วง คือ  $y = 6.0$  และ  $8.0$  ตามลำดับ ในการทดลองคณะผู้วิจัยได้ทำการปรับระยะช่องระหว่างแผ่นบิดเพื่อลดความเสียดทาน โดยการปรับทั้งหมด 3 ค่า คือระยะ  $s = 1.0, 2.0$  และ  $3.0$  ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การติดตั้งแผ่นบิดที่ระยะช่วงบิด  $y = 6.0$  และ  $8.0$  จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงขึ้นไปถึง 1.79 และ 1.45 เท่าของท่อเปล่าท่อ ผลการทดลองชี้บ่งว่าแผ่นบิดที่มีระยะช่วงบิดสั้นกว่า จะก่อให้เกิดการหมุนวนที่มากกว่า และการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าแผ่นบิดที่  $y = 8.0$  ขณะเดียวกันความเสียดทานสูงมากขึ้นตามเช่นกัน

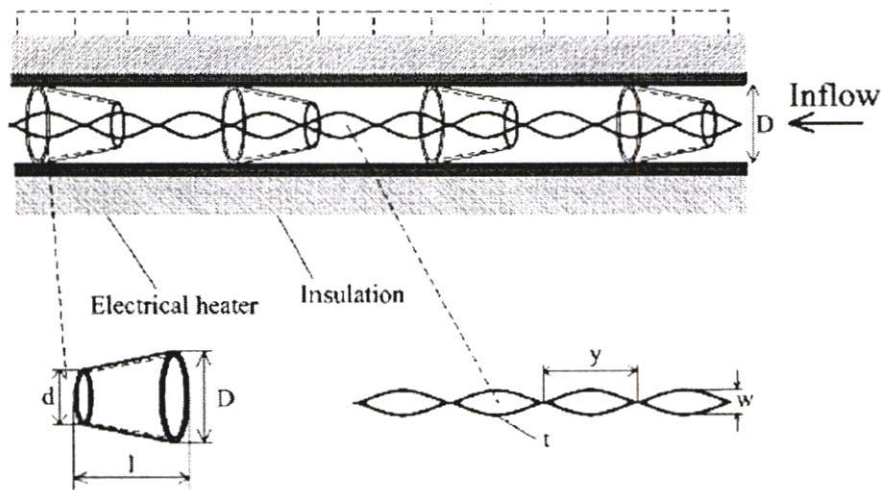
**2.2.5 งานวิจัย Saha, Dutla และ Dhal [12]** ได้ทำการศึกษาลักษณะแรงเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการไหลแบบราบเรียบในท่อที่ติดตั้งใบบิด จากการทดลองพบว่าท่อที่มีใบบิดอยู่เป็นช่วงๆ ทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นและความดันตกคร่อมลดลง การหมุนวนแบบราบเรียบของไหลชนิดที่มีตัวเลขพรันด์ ช่วงปานกลางการหมุนวนเกิดขึ้นจากการสอดใบบิดไป

เดี่ยวใส่เข้าไปในท่อและเชื่อมไบบิตด้วยแท่งกลมขนาดเล็กความกว้างของไบบิตและเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งทรงกลมที่ใช้แตกต่างกัน ผู้วิจัยยังศึกษาผลของการใช้มุมในการบิดมากกว่าศูนย์ ระหว่างไบบิตที่ต่อเชื่อมกัน การทดสอบการถ่ายเทความร้อน พบว่าการลดความกว้างของไบบิตที่ใส่เข้าไปในท่อมักทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง



รูปที่ 2.2 แสดงภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อซ้อนที่ติดตั้งแผ่นบิดในท่อชั้นใน

2.2.6 งานวิจัย P. Promvong และ S. Eiamsa-ard [6] ได้เสนอบทความการเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อกลมโดยการใช้กรวยวงแหวนพร้อมกับการสอดใส่ไบบิตเพื่อก่อให้เกิดการหมุนการถ่ายเทความร้อนในชุดทดลองโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าให้ความร้อนคงที่บริเวณผิวรอบท่อกลม ในการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากอุปกรณ์ส่วนแรกคือ กรวยวงแหวนเพื่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนในพื้นที่ท่อที่ทำกรทดสอบ ส่วนไบบิตสอดใส่เพื่อให้เกิดการหมุนวนบริเวณแกนกลางของกรวยวงแหวน โดยใช้อากาศเป็นของไหลในการทดลอง ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ อยู่ในช่วง 6,000 ถึง 26,000 ส่วนไบบิตมี Twist ratio,  $\gamma$  เท่ากับ 3.75 และ 7.5 ตามลำดับซึ่งผลจากการทดลองของท่อที่ใช้กรวยวงแหวนพร้อมกับการสอดใส่ไบบิต ช่วยเพิ่ม ตัวเลขนัสเซิลท์ 4 ถึง 10% และเพิ่มประสิทธิภาพ 4 ถึง 8% มากกว่าใช้กรวยวงแหวนอย่างเดียว อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 367% เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

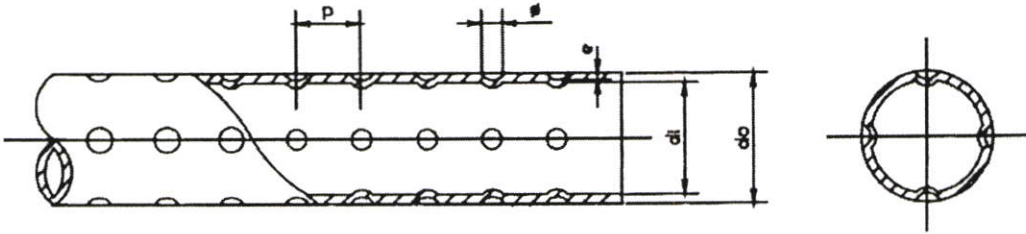


รูปที่ 2.3 แสดงภาพท่อทดสอบโดยการใช้กรวยวงแหวนพร้อมกับการสอดใส่ไบบิต่อ

**2.2.7 งานวิจัย S.Ray และ AW.Date [13]** ได้ศึกษาคุณลักษณะแรงเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งไบบิต ในบทความนี้กล่าวถึงวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข ซึ่งทำนายคุณลักษณะของการไหลแบบราบเรียบและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งไบบิต การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนศึกษาภายใต้สภาวะ constant heat flux จากการศึกษาสรุปได้ว่า ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์คงที่เมื่อลดค่า Twist ratio สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าตัวเลขนัสเซลท์จะเพิ่มขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบกับท่อกกลมหรือท่อสี่เหลี่ยมเปล่ากับท่อเดียวกันที่สอดใส่ไบบิต ประสิทธิภาพทางด้านความร้อนของท่อที่มีการสอดใส่ไบบิตจะดีกว่าซึ่งการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมพิจารณาค่าสูงสุดมากถึง 350 เปอร์เซ็นต์ มากกว่าท่อเรียบที่ใส่ไบบิตที่มี Twist ratio เหมือนกัน

**2.2.8 งานวิจัย Juin Chen , Hans Muller-Steinhagen และ Geoffrey G. Dufy[9]** ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อซ้อน จากการสร้างรอยนูนที่ท่อชั้นใน โดยมีรูปแบบรอยนูนที่แตกต่างกันจำนวน 6 รูปแบบ และทำการทดสอบในช่วงการไหลของน้ำเย็นในท่อชั้นใน ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ ระหว่าง  $7.5 \times 10^3$  ถึง  $5 \times 10^4$  ผลการทดลอง บ่งชี้ว่าสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น 25 ถึง 137 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ท่อชั้นในเป็นแบบผิวเรียบ และอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน กับ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ของท่อชั้นในที่มีรอยนูนแบบต่าง ๆ เปรียบเทียบ กับท่อชั้นในที่เป็นแบบผิวเรียบ จะอยู่ในช่วง 0.93 ถึง 1.16 ซึ่งจากผล

การศึกษาดังกล่าว เป็นที่น่าสังเกตว่า เทคนิคการสร้างรอยบุ๋มบางรูปแบบ มีอัตราการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน



รูปที่ 2.4 แสดงภาพท่อทดสอบที่สร้างผิวรอยบุ๋ม

# บทที่ 3

## ทฤษฎี

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยได้แก่การจำแนกลักษณะการไหลแบบบังคับภายในท่อการสูญเสียความดันคร่อมภายในท่อ พื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน และการวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อนภายในท่อผิวขรุขระ

### 3.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างของอุณหภูมิโดยจะเกิดการถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน, การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

#### 3.1.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิหรือการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างตัวกลางที่ติดกันเมื่อมีความแตกต่างกันของอุณหภูมิ โดยการนำความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในตัวกลางที่เป็นของแข็งซึ่งความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่าน โมเลกุลของเนื้อตัวกลางที่อยู่นิ่ง โดยอาจจะมีการสั่นของเหลวและก๊าซแต่ มักจะแยกออกจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาไม่ได้

หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อนถูกเสนอขึ้นโดย โจเซฟ ฟูรีเยร์ (Joseph Fourier) ในปี ค.ศ. 1822 โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองและได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ ไว้ดังนี้

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

หรือ

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $Q_x$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำผ่านพื้นที่หน้าตัด, W  
 $q_x$  คือ ค่าฟลักซ์ความร้อน, W/m<sup>2</sup>

$k$	คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity), W/mK
$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน, $m^2$
$\frac{dT}{dx}$	คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อระยะทาง

ตารางที่ 3.1 ค่าสภาพการนำความร้อน (ที่อุณหภูมิ 300 K)

วัสดุ	ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m °C)
เงิน	429
ทองแดงบริสุทธิ์	401
ทอง	317
อะลูมิเนียม	237
เหล็ก	80.2
ปรอท	8.54
แก้ว	1.4
อิฐ	0.72
น้ำ	0.613
ผิวหนังของคน	0.37
สารทำความเย็น R-12	0.072
อากาศ	0.026

ค่าสภาพการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุที่ได้จากการวัดและทดสอบ โดยทั่วไปค่าสภาพการนำความร้อนจะแปรผันตามอุณหภูมิซึ่งจากการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์จะพบว่าค่าสภาพการนำความร้อนของแก๊สจะแปรผันตามกำลังสองของอุณหภูมิสมบูรณ์และค่าสภาพการนำความร้อนของเหลวต่าง ๆ ยกเว้นน้ำจะแปรผันตามอุณหภูมิสมบูรณ์ สำหรับการใช้งานจริงที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไม่มากนักจะใช้ค่าสภาพการนำความร้อนคงที่ ซึ่งหาที่อุณหภูมิเฉลี่ย โดยค่า  $k$  ของสารทั่วไปดังแสดงในตาราง 3.1

### 3.1.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้หรือพาความร้อนจากผิวของแข็ง สำหรับกลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานี้จะเกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของของไหล การพาความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การพาความร้อน

โดยธรรมชาติ และการพาความร้อนโดยบังคับ โดยการพาโดยบังคับ (Force convection) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยของไหลจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของแข็ง โดยกลไกจากภายนอก เช่น พัดลม เครื่องสูบน้ำ เป็นต้น

สำหรับการพาความร้อนสมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาจะพิจารณาตาม Newton's Law of cooling คือ

$$Q_{conv.} = hA(T_s - T_f) \quad (3.3)$$

หรือ

$$q_{conv.} = h(T_s - T_f) \quad (3.4)$$

โดย  $(T_s > T_f)$

เมื่อ  $Q_{conv.}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาผ่านพื้นที่หน้าตัด, W

$q_{conv.}$  คือ ฟลักซ์ความร้อนโดยการพา,  $W/m^2$

$h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน,  $W/m^2 K$

$T_s$  คือ อุณหภูมิที่ผิวของแข็ง, K

$T_f$  คือ อุณหภูมิของของไหล, K

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาค่าได้จากการทดลอง ซึ่งได้มีการเก็บข้อมูลของของไหลบางชนิดและบางประเภทของการพาความร้อนไว้ดังแสดงในตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

ประเภทของการพาความร้อนและชนิดของไหล	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
การพาความร้อนแบบอิสระของอากาศ	5-25
การพาความร้อนแบบอิสระของน้ำ	20-100
การพาความร้อนแบบบังคับของอากาศ	10-200
การพาความร้อนแบบบังคับของน้ำ	50-10,000
น้ำในระหว่างการระเหย	3,000-100,000
น้ำในระหว่างการควบแน่น	5,000-100,000

### 3.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือ การส่งออกของรังสีที่เชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงอิเล็กตรอนขององค์ประกอบอะตอมหรือโมเลกุล โดยพลังงานของการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) หรือโฟตอน ในความเป็นจริงการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีนี้จะเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ในสภาพสุญญากาศซึ่งไม่จำเป็นที่จะต้องการตัวกลางแต่ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนหรือการพาความร้อนนั้นจะต้องการตัวกลาง

ฟลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีออกจากผิวตัวกลาง กำหนดจากกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann) ดังนี้

$$q_{rad} = \sigma T_s^4 \quad (3.5)$$

เมื่อ	$q_{rad}$	คือ ฟลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีความร้อน, $W/m^2$
	$\sigma$	คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ = $5.67 \times 10^{-8}$ , $W/m^2 K^4$
	$T_s$	คือ อุณหภูมิที่ผิวแผ่รังสี, K

สมการ 3.5 ใช้กับกรณีของตัวแผ่รังสีในอุดมคติ (Ideal Radiator) หรือวัตถุดำ (Black Body) สำหรับกรณีของพื้นผิวจริง (Real Surface) ฟลักซ์แผ่รังสีความร้อนจะน้อยกว่ากรณีของวัตถุดำ ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพเปล่งรังสี (Emissivity) ของพื้นผิวนั้น ฟลักซ์แผ่รังสีบนพื้นผิวจริงคำนวณจาก

$$q_{rad} = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $\epsilon$  คือ สภาพแผ่รังสี

ซึ่งในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในวิชานี้จะไม่นับพิจารณาถึงผลของการแผ่รังสีความร้อน

## 3.2 การไหลภายในท่อ

การไหลของของไหลสามารถแบ่งตามลักษณะการไหลได้เป็นสองรูปแบบการคือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ที่ของไหลจะเคลื่อนที่ไปอย่างมีระเบียบด้วยความเร็วค่อนข้างต่ำโดย

ไม่เกิดการผสมกันของกระแสการไหล และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ที่ของไหลจะเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วน ไม่มีระเบียบจึงทำให้เกิดการผสมกันของกระแสของไหล

ลักษณะของการไหลภายในท่อกลมของของไหลอาจใช้วิธีการสังเกตการไหลของของไหลที่ทางออกของท่อ โดยถ้าของไหลที่ไหลออกมาเป็นสองลำจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ แต่ถ้าของไหลที่ไหลออกมาเป็นลำเดียวจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนวิธีการนี้เหมาะกับการไหลที่สามารถสังเกตเห็นได้ เช่น น้ำ โลหะเหลว เป็นต้น หรือการพ่นสีเพื่อสังเกตลักษณะการไหลของสีก็เป็นวิธีการในการช่วยจำแนกการไหลได้เช่นเดียวกัน

### 3.2.1 ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)

นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกการไหลได้จากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ซึ่งอัตราส่วนของแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงความหนืด (Viscose force) โดยทั่วไปกรณีการไหลมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ น้อยกว่า 2,300 ถึง 4,000 จะจัดเป็นการไหลแบบเปลี่ยน แปลง (Transition flow) และกรณีของไหลมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 4,000 จะจัดเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งค่าตัวเลขเรย์โนลด์ มีนิยามดังนี้

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.7)$$

โดย	Re	คือ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของไหล, $\text{kg/m}^3$
	$V$	คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, $\text{m/s}$
	$D$	คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ, $\text{m}$
	$\mu$	คือ ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล, $\text{kg/m s}$

## 3.3 การสูญเสียภายในท่อ

การสูญเสียภายในท่อสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบ คือ การสูญเสียหลัก (Major loss) และการสูญเสียรอง (Minor loss)

### 3.3.1 การสูญเสียหลัก

การสูญเสียหลักเกิดขึ้นจากแรงเสียดทานในท่ออันเนื่องมาจากขนาดของท่อ ความยาวของท่อ และความเร็วในการไหลภายในท่อของของไหล ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\Delta P = \frac{fL\rho V^2}{2D_h} \tag{3.8a}$$

- โดย  $\Delta P$       คือ ความดันตกคร่อมภายในท่อ, Pa
- $f$                 คือ Friction Factor
- $L$                 คือ ความยาวของท่อ, m
- $V$                 คือ ความเร็วของไหลเฉลี่ย, m/s

ค่า  $f$  ที่คำนวณได้จากสมการต่างๆ อาจจะนำมาใช้งานจริงได้ไม่สะดวกนัก จึงมักจำหาค่า  $f$  จากแผนภูมิที่เรียกว่า Moody chart ซึ่ง Moody ได้พล็อตค่าข้อมูลที่ดีที่สุดลงในสมการ โดยการใช้ Moody chart จะต้องทราบค่าความขรุขระสัมบูรณ์ของท่อดังแสดงในตารางที่ 3.3

ในทางปฏิบัติค่า  $f$  ของท่อผิวเรียบอาจจะคลาดเคลื่อน 5% ส่วนท่อผิวขรุขระก็อาจจะคลาดเคลื่อน 10% ดังนั้นการใช้ค่าความขรุขระสัมบูรณ์จึงต้องพิจารณาให้ดีเนื่องจากจะมีผลกระทบต่อค่าความดันตกคร่อมได้

ตารางที่ 3.3 ค่าความขรุขระสัมบูรณ์ของท่อ

ประเภทของท่อ	ค่าความขรุขระสัมบูรณ์
ท่อที่รีดขึ้นรูป ท่อทองเหลือง ท่อดีบุก ท่อที่เคลือบปิทมินัส ท่อซีเมนต์ที่หล่อด้วยการเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	0.0015
ท่อเหล็กเหนียว	0.046
ท่อเหล็กหล่อที่ขึ้นรูปโดยการเชื่อม	0.046
ท่อเหล็กหล่อเคลือบขางมะตอย	0.12
ท่อชุบสังกะสี	0.15
ท่อเหล็กหล่อทั่วไป	0.25
ท่อไม้	0.18-0.9
ท่อคอนกรีต	0.3-3
ท่อเหล็กที่ใช้หมุดย้ำ	0.9-9

### 3.3.2 การสูญเสียรอง

การสูญเสียรองจะเกิดจากการไหลผ่านท่อที่เปลี่ยนแปลงขนาดกะทันหันหรือการไหลผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ข้อต่อ ข้องอ เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$h_m = \frac{KV^2}{2g} \quad (3.8b)$$

เมื่อ	$h_m$	คือ การสูญเสียรอง, m
	$V$	คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลภายในท่อ, m/s
	$g$	คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s <sup>2</sup>
	$K$	คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย

ซึ่งการสูญเสียรองจะมีค่าค่อนข้างน้อย ดังนั้นในการทดลองจะพิจารณาเฉพาะการสูญเสียหลักเท่านั้น

### 3.4 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

การทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสามารถทำได้สองวิธี คือ

#### 3.4.1 วิธีแบบ Active

วิธีนี้ต้องการแหล่งพลังงานภายนอก เช่น การใช้อุปกรณ์ทางกล การทำให้เกิดการสั่นของพื้นผิว การทำให้เกิดการสั่นของของไหล การใช้สนามไฟฟ้าสถิตการฉีดพ่นหรือดูดของไหล

#### 3.4.2 วิธีแบบ Passive

วิธีแบบนี้ไม่ต้องการแหล่งพลังงานภายนอก ได้แก่ การใช้พื้นที่ที่ได้รับการปรับสภาพการใช้พื้นผิวหยาบ การเพิ่มพื้นที่ผิว การติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ การติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้อากาศเกิดการหมุนวน การสอดใส่แผ่นไบบีด เป็นต้น

### 3.5 การถ่ายเทความร้อนภายในท่อ

#### 3.5.1 ค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number)

ค่าตัวเลขนัสเซลท์ เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ ที่มีความสำคัญต่อความร้อน เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสภาพการถ่ายเทความร้อน โดยเป็นอัตราส่วนระหว่าง การพาความร้อนและการนำความร้อน

$$Nu_D = \frac{Dh}{k} \quad (3.9)$$

เมื่อ	$Nu_D$	คือ ค่าตัวเลขนัสเซิลท์
	$h$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2\text{ }^\circ C$
	$k$	คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ, $W/m\text{ }^\circ C$

### 3.5.2 การถ่ายเทความร้อนภายในท่อผิวเรียบ

ค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับรูปแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สภาพการไหลของของไหล สมบัติเชิงความร้อนของของไหลและยังขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงสถานะของของไหลด้วย

- กรณีท่อเรียบ

$$h = \frac{Nu_D k}{D} \quad (3.10)$$

เมื่อ	$h$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2\text{ }^\circ C$
	$k$	คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ, $W/m\text{ }^\circ C$
	$Nu_D$	คือ ค่าตัวเลขนัสเซิลท์

สำหรับการไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่ช่วงปรับตัวเต็มในท่อกลมเรียบโดย  $Nu_D$  หาได้จากสมการของ Duttus-Boelter

$$St = \frac{\overline{Nu}}{Re Pr} = \frac{f}{8}$$

$$f = 0.184 Re^{-0.2}$$

$$St = 0.023 Re^{-0.2}$$

ดังนั้น

$$\overline{Nu} = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (3.11)$$

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

$n = 0.3$  คือ สำหรับการทำให้เย็น

$Pr$  คือ ค่าตัวเลขพรันด์

$$\text{สมการนี้สำหรับช่วงของเงื่อนไขดังนี้} \left[ \begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ Re_D \geq 10000 \\ L/D \geq 10 \end{array} \right]$$

ซึ่งการศึกษานี้ได้นำ สมการสหพันธ์หาค่า  $Nu_D$  ของ Duttus-Boelter มาทำการเปรียบเทียบกับ ผลการวิเคราะห์  $Nu_D$  จากการทดลองกรณีการไหลในท่อเปล่าผิวเรียบ โดยวิธีการ Wilson Plot Method เพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนจากการทดลองกับทางทฤษฎี

### 3.5.3 การวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกรณีผิวไม่เรียบ ด้วยวิธีการ Wilson plot Method

เนื่องจากท่อที่ทำการทดสอบผิวท่อมมีลักษณะขรุขระจากการสร้างรอยบุ๋ม ดังนั้นหลักการวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อนในกรณีการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมผิวเรียบ ดังเช่น สมการสหพันธ์ของ Duttus-Boelter จึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยนี้ ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อนของการไหลในท่อที่ผิวมีลักษณะขรุขระจากการสร้างรอยบุ๋มนี้ ได้นำหลักการ Wilson plot Method มาทำการวิเคราะห์ ซึ่งหลักการคือพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นตรงและกราฟเส้นตรง โดยพิจารณาว่าคุณสมบัติของของไหลไม่เปลี่ยนแปลง จากความสัมพันธ์คุณสมบัติการไหลแบบปั่นป่วนพิจารณาจากความสัมพันธ์ของสมการการไร้มิติ

$$Nu = C Re^n \cdot Pr^m \quad (3.12)$$

โดยที่  $Nu$  คือ ค่าตัวเลขนัสเซลท์  
 $Re$  คือ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์  
 $Pr$  คือ ค่าตัวเลขพรันด์

จากสมการความสัมพันธ์

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.13)$$

จากสมการ 3.12 และ 3.13 โดยพิจารณาว่าคุณสมบัติของไหลไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจึงแปรเปลี่ยนตามอัตราการไหลของไหล หรือ

$$h = C V^n \quad (3.14)$$

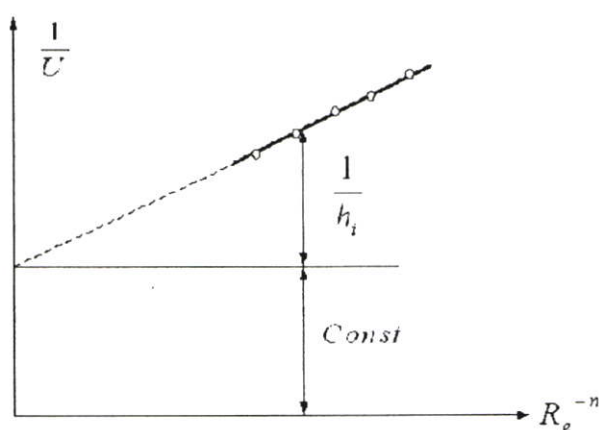
จากการศึกษาที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน 2 ชั้น แยกการไหลของน้ำร้อนในท่อในและน้ำเย็นในท่อนอก โดยนิยามการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ที่อยู่ในเทอมของความต้านทานความร้อนรวมต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิด สัมประสิทธิ์นี้หาได้ จากการรวมความต้านทานการนำความร้อน และการพาความร้อนระหว่างของไหลที่ถูกแยกโดยผนังท่อ พิจารณาเนื่องจากผนังท่อบางมากและไม่คิดแฟลคเตอร์ความสกปรกจึงได้สมการความสัมพันธ์

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (3.15)$$

จากสมการ 3.14 แทนค่าลงสมการ 3.15 พิจารณาที่อัตราการไหลของน้ำเย็นคงที่ดังนั้นพจน์ที่สองด้านขวามือของสมการ 3.15 จึงถือเป็นค่าคงที่ มีเพียงการปรับเปลี่ยนอัตราไหลของน้ำร้อนอย่างเดียว ดังนั้น

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{C_i V_i^{0.8}} + \text{const} \quad (3.16)$$

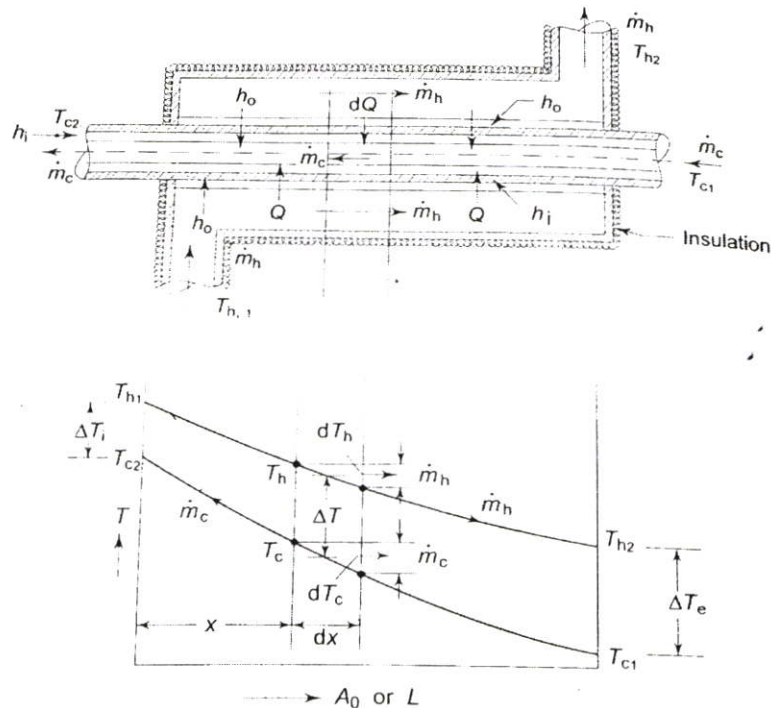
พิจารณาสมการด้านบนในรูปแบบสมการเส้นตรง  $y = mx + c$  สร้างเส้นกราฟเพื่อหาจุดตัดแกน  $y$  ซึ่งเท่ากับค่าคงที่ (Constant) ก็จะสามารถหาค่า  $h_o$  ได้และเมื่อแทนค่าในสมการ 3.15 จะสามารถหาค่า  $h_i$  แล้วนำไปสู่การคำนวณเพื่อหาค่า  $Nu_D$  ได้ต่อไปจากสมการ 3.13



รูปที่ 3.1 การหา  $h_o$  โดยวิธีการ Wilson-plot Method

### 3.6 การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกันโดยวิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (LMTD)

งานวิจัยนี้ ทำการทดลองศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกัน ในรูปแบบการไหลสวนทางกัน จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์โดยวิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม(LMTD) และลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนรูปแบบการไหลสวนทางกัน ซึ่งมีจุดมุ่งหมายใช้วิเคราะห์เพื่อหาค่า  $U$  (สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม) เพื่อนำไปแทนค่าในสมการ (3.15) เพื่อใช้หาค่า  $h_o$  และ  $h_i$  โดยหลักการ Wilson-plot Method และนำไปสู่การหาค่า  $Nu$  ได้ต่อไป



รูปที่ 3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนและรูปร่างของอุณหภูมิสำหรับการไหลสวนทางกัน

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนรูปแบบการไหลสวนทางกัน (Counterflow Heat exchanger) สมดุลพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทผ่านพื้นที่  $dA_0 (\pi D_o dx)$  เขียนได้เป็น

$$dQ = -\dot{m}_h^o c_h dT_h = -\dot{m}_c^o c_c dT_c = U_0 dA_0 \Delta T \quad (3.17)$$

เมื่อ  $\Delta T = T_h - T_c$

$$\begin{aligned}
 d(\Delta T) &= dT_h - dT_c = -\frac{dQ}{m_h^o c_h} + \frac{dQ}{m_c^o c_c} \\
 &= -dQ \left( \frac{1}{m_h^o c_h} - \frac{1}{m_c^o c_c} \right) \\
 &= -dQ \mu_c
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

เมื่อ  $\mu_c = \frac{1}{m_h^o c_h} - \frac{1}{m_c^o c_c}$  (3.19)

เนื่องด้วย  $\mu_c$  เป็นค่าคงที่, ทำการอินทิเกรตตลอดพื้นผิว

$$\Delta T_i - \Delta T_e = \mu_c Q \tag{3.20}$$

และจาก  $dQ = U_o dA_o \Delta T$

แทนค่าในสมการ (3.18) จะได้

$$-\frac{d(\Delta T)}{\mu_c} = U_o dA_o \Delta T$$

อินทิเกรตจากทางเข้าไปทางออก  $\int_i^e -\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = \int_i^e U_o dA_o \mu_c$ ,

พิจารณา  $U_o$  เป็นค่าคงที่

$$\ln \frac{\Delta T_i}{\Delta T_e} = U_o A_o \mu_c \tag{3.21}$$

จากสมการ (3.20) และ (3.21)

$$\begin{aligned}
 Q &= U_o A_o (\Delta T)_{lm} \\
 &= m_h^o c_c (T_{h1} - T_{h2}) \\
 &= m_h^o c_c (T_{c2} - T_{c1})
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

โดย  $\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_e}{\ln \Delta T_i / \Delta T_e} = LMTD$  (3.23)

$$\Delta T_i = T_{h1} - T_{c2} \quad \text{และ} \quad \Delta T_e = T_{h2} - T_{c1}$$

ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมินี้เรียกว่า log mean temperature difference (LMTD) ซึ่งเป็นความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายข้างหนึ่งของเครื่องลบด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายของหนึ่งของเครื่อง หาคด้วยค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองนี้

### 3.7 ประสิทธิภาพของการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

นิยามของประสิทธิภาพของการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากคิดที่กำลั้งปั้มเดียวกันดังนี้

$$(\dot{V}\Delta P)_p = (\dot{V}\Delta P)_{HP} \quad (3.24)$$

จัดรูปแบบสมการ

$$\left( \frac{\pi D \mu \text{Re}}{4\rho} \cdot f \frac{L\rho}{2D} \left( \frac{\mu \text{Re}}{\rho D} \right)^2 \right)_p = \left( \frac{\pi D \mu \text{Re}}{4\rho} \cdot f \frac{L\rho}{2D} \left( \frac{\mu \text{Re}}{\rho D} \right)^2 \right)_{HP} \quad (3.25)$$

เนื่องจากเป็นท่อเดียวกันและของไหลชนิดเดียวกันตัวแปร  $\pi, D, \mu, \rho, L$  คงที่

$$\frac{\text{Re}_{HP}}{\text{Re}_p} = \left( \frac{f_{HP}}{f_p} \right)^{-1/3} \quad (3.26)$$

จากนิยามของประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

$$\eta = \frac{h_{HT}}{h_p} \Big|_{pp} = \frac{Nu_{HT}}{Nu_p} \Big|_{pp} \quad (3.27)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่กำลั้งปั้มเดียวกัน คือ

$$\eta_{pp} = \left[ \frac{Nu_{HT}}{Nu_p} \right]_{pp} = \left[ \frac{h_{HT}}{h_p} \right]_{pp} = \left( \frac{Nu_{HT}}{Nu_p} \right) \left( \frac{f_{HT}}{f_p} \right)^{-1/3} \quad (3.28)$$

โดยที่

$A$  คือ พื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อนตามนิยาม ( $m^2$ )

$Q$  คือ อัตราความร้อนที่ถ่ายเท (W)

$U$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $W/m^2 K$ )

$V$  คือ อัตราไหลเชิงปริมาตร ( $m^3/s$ )

$f$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

$h_i$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านในท่อ ( $W/m^2 K$ )

$h_o$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านนอกท่อ ( $W/m^2 K$ )

$\Delta T_{lm}$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ย (K)

$Nu$  คือ ตัวเลขนัสเซิลท์

$\Delta P$  คือ ความดันตกคร่อม ( $N/m^2$ )

$C_p$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะ ( $J/Kg K$ )

$i, o$  คือ ทางเข้า, ทางออก

$h, c$  คือ น้ำร้อน, น้ำเย็น

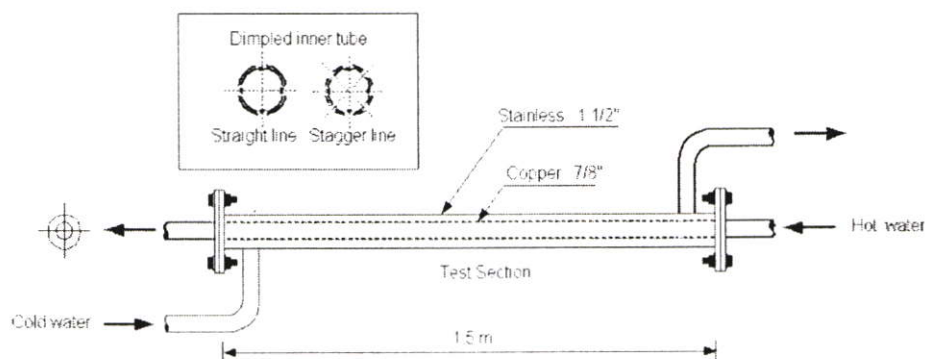
## บทที่ 4

# อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

### 4.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้แสดงอุปกรณ์สำหรับการทดลองรวมทั้งวิธีการทดลองเพื่อศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการสร้างรอยบวมที่ผิวท่อชั้นใน จำนวน 4 แถว เส้นผ่าศูนย์กลางรอยบวม 3 มิลลิเมตร ความลึก 2 มิลลิเมตร ระยะการวางรอยบวมแตกต่างกัน ทั้งในแนวตรงและแนวสลับ ร่วมกับการใส่ไบบิตเต็มที่มีระยะพิทช์แตกต่างกันไป เช่นกัน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนจุดศูนย์กลางร่วมและอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.9 ประกอบด้วยถังเก็บน้ำร้อน, ถังเก็บน้ำเย็นขนาดเท่ากันที่ยกสูงจากพื้นเหนือส่วนทดสอบในระดับความสูงเท่ากัน, ถังพักน้ำร้อนและน้ำเย็นด้านล่าง, ป้อนน้ำร้อนสำหรับหมุนเวียนน้ำร้อนกลับขึ้นสู่ถังเก็บน้ำร้อน สำหรับส่วนชุดทดสอบเป็นลักษณะท่อซ้อนที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ความยาว 1.5 เมตร ท่อชั้นในทำจากท่อทองแดง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 22.2 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 20.6 มิลลิเมตร โดยจะเป็นท่อผิวเรียบ และท่อชั้นในที่มีรอยบวม ที่อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ สำหรับการวางรอยบวมแนวตรง S เท่ากับ 0.7 และ 1 และอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ สำหรับการวางรอยบวมแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 และ 1 เช่นเดียวกัน ส่วนไบบิตเต็มที่นำมาใส่ในท่อทองแดง มีอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความกว้างไบบิต Y เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ ส่วนท่อด้านนอกเป็น ท่อสแตนเลส มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 38 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 35 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทดสอบ 1.5 เมตร บริเวณภายนอกของท่อทดสอบมีการหุ้มฉนวนขากันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม



รูปที่ 4.1 ส่วนทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนและการวางแนวรอยบวม



รูปที่ 4.2 แสดงภาพท่อทองแดงที่ทำการสร้างไฟเบอร์ออปติก

โดยกำหนดค่า  $S = P/D$

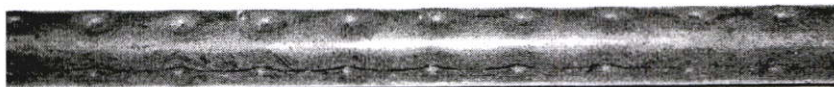
$Z = P/D$

S คือ อัตราส่วนระยะรอยงุ่มสำหรับรอยงุ่มแนวตรง

Z คือ อัตราส่วนระยะรอยงุ่มสำหรับรอยงุ่มแนวสลับ

P คือ ระยะพิทช์

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ



รูปที่ 4.3 แสดงภาพท่อทองแดงที่มีไฟเบอร์ออปติกแนวตรง



รูปที่ 4.4 แสดงภาพท่อทองแดงที่มีไฟเบอร์ออปติกแนวสลับ



รูปที่ 4.5 แสดงภาพไบบิคอลูมิเนียมแผ่นบาง

โดยกำหนดค่า  $Y = P/W$

Y คือ Twist ratio

P คือ ระยะพิทช์

W คือ ความกว้างไบบิค



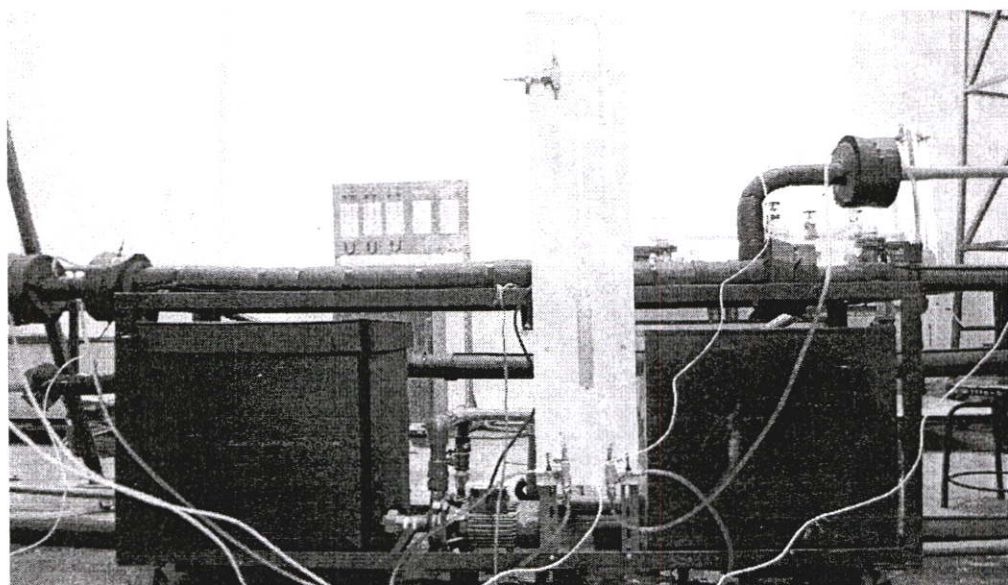
รูปที่ 4.6 แสดงภาพไบบิคอลูมิเนียมแผ่นบาง  $Y = 3$



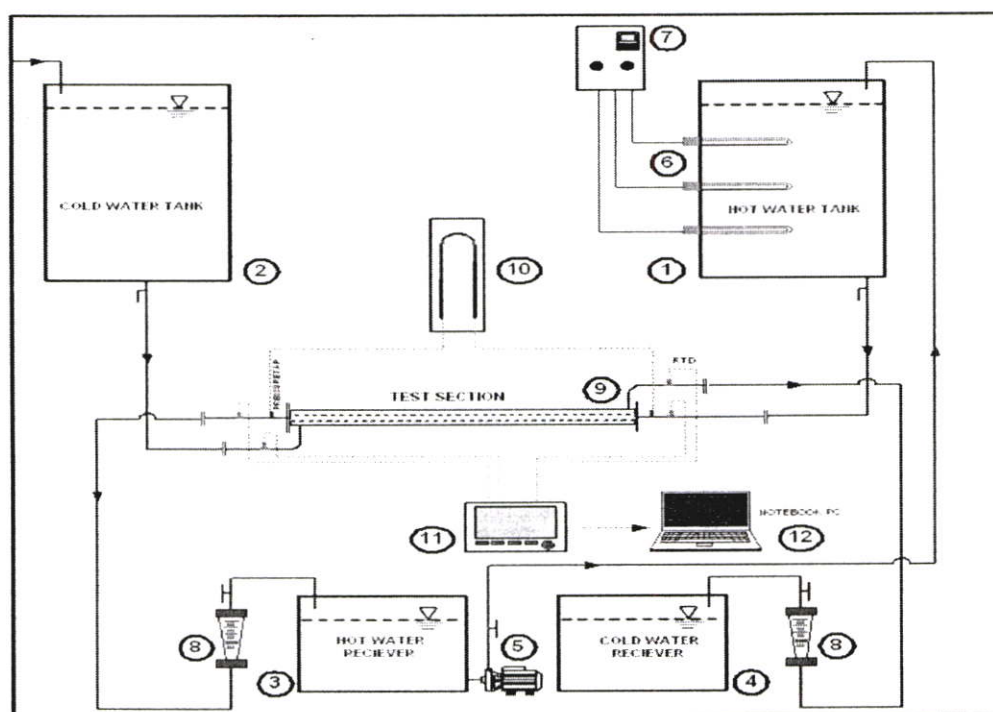
รูปที่ 4.7 แสดงภาพไบบิคอลูมิเนียมแผ่นบาง  $Y = 5$



รูปที่ 4.8 แสดงภาพไบบิคอลูมิเนียมแผ่นบาง  $Y = 7$



รูปที่ 4.9 แสดงภาพชุดทดลอง



- |                   |                             |                           |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1. ถังเก็บน้ำร้อน | 5. ปั๊มน้ำร้อน              | 9. ส่วนทดสอบ              |
| 2. ถังเก็บน้ำเย็น | 6. ฮีตเตอร์                 | 10. มานอมิเตอร์           |
| 3. ถังพักน้ำร้อน  | 7. ชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อน | 11. เครื่องบันทึกอุณหภูมิ |
| 4. ถังพักน้ำเย็น  | 8. โรตานิเตอร์              | 12. คอมพิวเตอร์           |

รูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพของชุดทดลอง

## 4.2 อุปกรณ์การทดลอง

### 4.2.1 กำลังของเครื่องทำความร้อน

การคำนวณหากำลังของเครื่องทำความร้อน จำเป็นต้องทราบถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบก่อน เช่น อุณหภูมิน้ำร้อนที่กำหนดและอัตราการไหลสูงสุดที่จะทำการทดลอง ก็จะสามารถหาค่ากำลังของเครื่องทำความร้อนได้ โดยกำลังของเครื่องทำความร้อนสามารถหาได้จากอัตราไหลเชิงมวลคูณกับค่าความจุความร้อนจำเพาะและผลต่างของอุณหภูมิ ตามสมการดังนี้

$$Q = m^{\circ} C_p (T_i - T_o)$$

$Q$  คือ กำลังเครื่องทำความร้อน, kW

$m^{\circ}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s

$C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, kJ/kg °C

$T_i$  คือ อุณหภูมิที่ทางเข้า, °C

$T_o$  คือ อุณหภูมิที่ทางออก, °C

### 4.2.2 กำลังของเครื่องสูบลม

การคำนวณหากำลังของเครื่องสูบลม เพื่อให้สามารถสูบน้ำให้ได้ความสูงและอัตราการไหลของน้ำตามต้องการสามารถจะคำนวณกำลังของปั๊มได้ตามสมการ

$$P = \gamma H Q$$

$P$  คือ กำลังของปั๊มน้ำที่ต้องการ, W

$\gamma$  คือ น้ำหนักจำเพาะของน้ำ หน่วย, N/m<sup>3</sup>

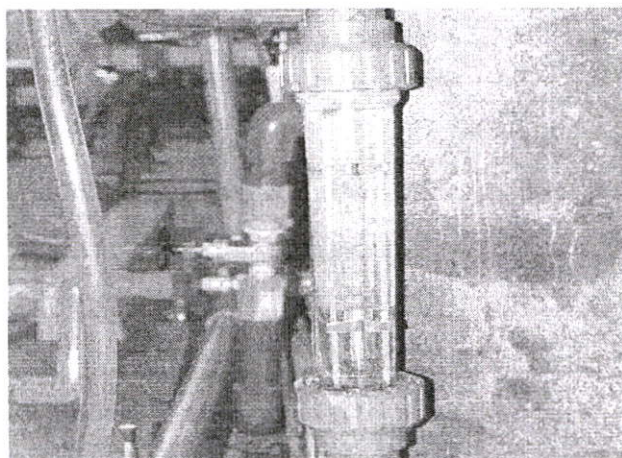
$Q$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ, m<sup>3</sup>/s

กำลังของปั๊มน้ำที่คำนวณได้จากสมการดังกล่าว เป็นกำลังที่ต้องใช้ในการขับปั๊มซึ่งต้องนำไปเลือกขนาดมอเตอร์มาขับปั๊มอีกต่อหนึ่งโดยเลือกขนาดที่สูงกว่ากำลังของปั๊มที่คำนวณได้เพราะการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าจะมีการสูญเสียต่างๆเกิดขึ้น

### 4.2.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล

การวัดอัตราการไหลของของไหลภายในท่อจำเป็นต้องเลือกประเภทและชนิดของเครื่องมือที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานสำหรับ การทดลองนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบ โรตاميเตอร์ เพื่อวัดอัตราการไหลของน้ำร้อนและน้ำเย็น

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลโรตاميเตอร์ มีหลักการทำงาน คือการใช้ลูกลอยติดตั้งในท่อรูปกรวยในแนวตั้ง ของเหลวจะไหลเข้าทางด้านล่างของท่อและยกลูกลอยขึ้นระดับความสูงของลูกลอยจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นลูกลอยจะถูกยกสูงขึ้นพื้นที่การไหลก็ยิ่งเพิ่มมากขึ้นในกรณีของของเหลวลูกลอยถูกยกขึ้นจากผลของแรงลอยตัวและแรงดันจากความเร็วของของไหล แต่สำหรับก๊าซนั้น เนื่องจากแรงลอยตัวซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันจากความเร็วของของไหลเพียงอย่างเดียว ลูกลอยจะลอยตัวในตำแหน่งสมดุลเมื่อแรงยกตัวจากการไหลเท่ากับแรงกดจากแรงดึงดูดของโลก



รูปที่ 4.11 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลโรตاميเตอร์

### 4.2.4 อุปกรณ์วัดความดัน

การวัดความดันของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ ให้ความความถูกต้องแม่นยำนั้นจะต้องใช้เครื่องมือที่ไม่รบกวนการไหลและรูเจาะไว้สำหรับวัดความดันภายในของท่อจะต้องตั้งฉากกับผิวภายในท่อ โดยต้องทำการเลือกสารตัวกลางสำหรับ U-Tube มาโนมิเตอร์ให้เหมาะสมกับความดันของไหลในการทดลองนี้เลือกใช้น้ำเป็นสารตัวกลางสำหรับวัดระดับความแตกต่างของสารตัวกลางในกระเปาะแก้วทั้งสองด้านของมาโนมิเตอร์โดยสามารถคำนวณความแตกต่างของความดันตามสมการ

$$P_A - P_B = \rho gh$$

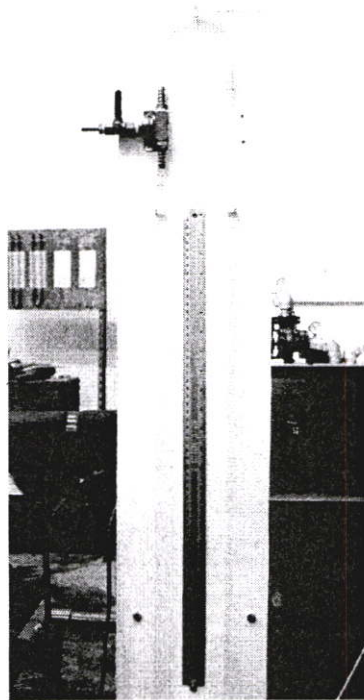
$P_A$  คือ ความดันที่ตำแหน่ง A,  $N/m^2$

$P_B$  คือ ความดันที่ตำแหน่ง B,  $N/m^2$

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหลภายในท่อ,  $kg/m^3$

$g$  คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง,  $m/s^2$

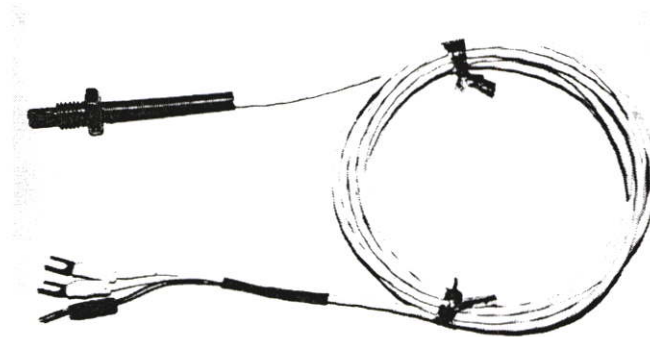
$h$  คือ ความแตกต่างของระดับของเหลว, m



รูปที่ 4.12 อุปกรณ์วัดความดัน U-Tube มาโนมิเตอร์

#### 4.2.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

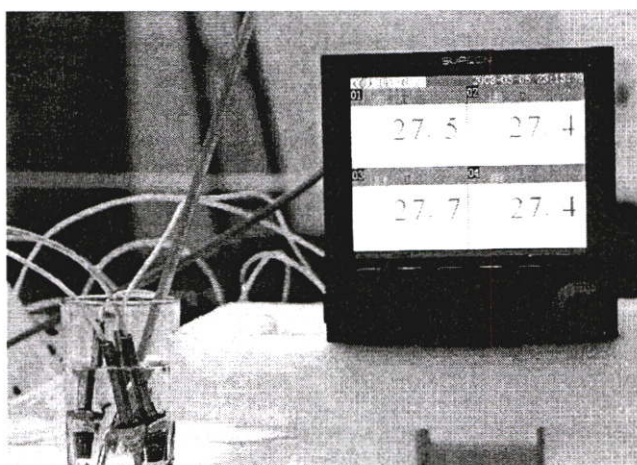
การเลือกประเภทและชนิดเครื่องมือวัดอุณหภูมิให้เหมาะสมกับการใช้งาน เป็นสิ่งสำคัญ ต่อความถูกต้องและแม่นยำของการวัดค่า การทดลองนี้เลือกใช้หัววัดอุณหภูมิชนิด RTD Pt 100 ที่ มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ค่อนข้างดี เพื่อวัดอุณหภูมิน้ำร้อน และน้ำเย็น ทั้ง ทางด้านเข้าและด้านออกชุดทดสอบโดยหัววัดอุณหภูมิชนิด RTD Pt 100 ใช้หลักการของค่าความ ด้านทานที่จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น RTD ที่ทำจากแพลตตินัม (Platinum) ที่มีค่า  $100\Omega$  ที่  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  หรือเรียกว่า Pt 100 โดยจะมีคุณสมบัติดีกว่าเทอร์โมคัปเปิลคือมีเสถียรภาพสูงมีความเป็นเชิง เส้นมากกว่าเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 4.13 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ RTD Pt 100

#### 4.2.6 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล

การทดลองนี้ใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิ Supcon R3000/4000 series Recorder เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและบันทึกอุณหภูมิที่ทำการเชื่อมต่อจาก RTD ซึ่งจะรับค่าอุณหภูมิของน้ำร้อนและน้ำเย็น แล้วเปลี่ยนเป็นกระแสไฟ ส่งมายังระบบบันทึกข้อมูลซึ่งจะแสดงค่าเป็นตัวเลขดิจิทัลและทำการบันทึกข้อมูลลงหน่วยความจำภายในเครื่อง ซึ่งมีรายละเอียดส่วนประกอบคือ ส่วนแสดงผล, กราฟเส้น (real-time trend), กราฟแท่ง (bar graph), แสดงข้อมูลย้อนหลังแบบ historical trend เป็นต้น หน่วยความจำใช้สำหรับเก็บข้อมูลแบบ flash memory จำนวนอินพุตมีให้เลือกตั้งแต่ 1- 12 แชนแนล สัญญาณอินพุตแบบ universal เช่น DC mA, DCV, TC, RTD เป็นต้น มีพอร์ต RS-232 หรือ RS-485 ไว้ติดต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ และมีปุ่มต่างๆ ในการเซ็ทค่า



รูปที่ 4.14 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ RTD และการสอบเทียบ

### 4.3 การทดลอง

การทดลองโดยทำการปรับอัตราการไหลของน้ำร้อนและน้ำเย็นด้วยวาล์วและตรวจสอบอัตราการไหลจากโรตاميเตอร์ น้ำร้อนถูกทำให้ร้อนด้วยฮีตเตอร์แบบจุ่มขนาด 6 kW จำนวน 3 ชุด ที่ติดตั้งภายในถังเก็บน้ำร้อนเพื่อทำความร้อนให้ได้อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C} \pm 0.5$  ส่วนน้ำเย็นใช้น้ำประปาในการทดลองอุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C} \pm 2$  การวัดอุณหภูมิน้ำร้อนและน้ำเย็นที่ทางเข้าและทางออกชุดท่อทดลองถูกวัดด้วย RTD Pt 100 จำนวน 4 ตัวบันทึกค่าอุณหภูมิด้วย Data logger ยี่ห้อ Supcon R3000/4000 series Recorder ที่สามารถบันทึกค่าสูงสุด 12 ช่องสัญญาณการวัดความดันตกคร่อมโดยใช้ มาโนมิเตอร์แบบ U-Tube โดยก่อนการทดลองมีการสอบเทียบโรตاميเตอร์ทั้งสองชุดโดยการอ่านค่าอัตราการไหลจากโรตاميเตอร์เปรียบเทียบกับ การจับเวลาการไหลของและปริมาณน้ำ เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ส่วน RTD Pt 100 ทั้ง 4 ตัวมีการสอบเทียบค่าโดยการทดสอบวัดอุณหภูมิน้ำร้อนและน้ำเย็นจากแหล่งเดียวกันในเวลาพร้อมกันเพื่อตรวจสอบค่าความถูกต้อง

#### 4.3.1 การเตรียมการทดลอง

1. เปิดน้ำจากระบบประปาเข้าถังพักน้ำร้อน(ด้านล่างชุดทดลอง)
2. เปิดปั๊มน้ำร้อน เพื่อส่งน้ำจากถังพักน้ำร้อนขึ้นสู่ถังเก็บน้ำร้อน จนถึงระดับที่ปรับตั้งไว้ (ตรวจสอบจากการไหลล้นช่อง Over flow ) และปิดน้ำจากระบบประปา
3. เปิดวาล์วให้น้ำร้อนไหลลงจากถังเก็บน้ำร้อนด้านบนผ่านเข้าสู่ชุดทดลอง ผ่าน Rotameter ไหลลงสู่ถังพักน้ำร้อน พร้อมกับปรับวาล์วควบคุมอัตราไหลของปั๊มน้ำร้อนให้เหมาะสม เพื่อปั๊มน้ำหมุนเวียน จากถังพักน้ำร้อนด้านล่าง ขึ้นสู่ถังเก็บน้ำร้อนด้านบน ให้สัมพันธ์กับอัตราไหลน้ำที่ปล่อยลงมาจากถังเก็บน้ำร้อน โดยที่ระดับน้ำในถังเก็บน้ำร้อนอยู่ที่ระดับที่ปรับตั้งไว้
4. ปรับตั้งอุณหภูมิน้ำร้อนที่ Control panel ที่  $70^{\circ}\text{C}$  และกดสวิทซ์การทำงานของ Heater เมื่อ Heater ทำงาน จนอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บได้  $70^{\circ}\text{C}$  แล้ว เปิดน้ำจากระบบประปาขึ้นสู่ถังเก็บน้ำเย็นด้านบน
5. เมื่อน้ำในถังเก็บน้ำเย็นด้านบนอยู่ที่ระดับที่ตั้งไว้แล้ว (ตรวจสอบจากการไหลล้นช่อง Over flow ) เปิดวาล์วน้ำเย็นด้านล่างถึง เพื่อให้ น้ำเย็น ไหลจากถังเก็บด้านบนเข้าสู่ชุดทดลอง ผ่าน Rotameter และเข้าสู่ถังพักน้ำเย็นก่อนไหลออกจากระบบทดลอง
6. ปรับวาล์วควบคุมการไหลของน้ำเย็น เข้าสู่ชุดทดลองและเปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลน้ำระบบประปาที่ส่งเข้าถังเก็บน้ำเย็นด้านบน ให้สัมพันธ์กันกับอัตราการไหลน้ำเย็นเข้าส่วนทดสอบ เพื่อให้มีการไหลล้น Over flow เพื่อให้สามารถตรวจสอบระดับน้ำในถังน้ำเย็น ว่าอยู่ในระดับที่กำหนดไว้ตลอดเวลาช่วงการทดลองหรือไม่

#### 4.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

หลังจากการเตรียมความพร้อม เพื่อการทดลองศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและผล ความเสียดทานการไหล ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน โดยการออกแบบผิวท่อ ทดสอบให้มีรอยบุ๋มร่วมกับการใส่ไบบิตเต็มด้านใน จะมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ปรับวาล์วอัตราการไหลของน้ำเย็น ตรวจสอบอัตราการไหลจากโรตاميเตอร์ให้คงที่ 1,200 ลิตร/ชั่วโมง
2. ปรับวาล์วอัตราการไหลของน้ำร้อน พร้อมตรวจสอบอัตราการไหลจากโรตاميเตอร์ให้ ได้อัตราการไหลที่กำหนดไว้ และเมื่อค่าอุณหภูมิที่วัดจาก RTD Pt100 ของน้ำร้อนที่ทางเข้า เป็น  $70 \pm 0.5$  °C แล้ว จึงเริ่มอ่านและบันทึกค่า อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า-ออก, อุณหภูมิน้ำเย็นเข้า-ออก ชุด ทดสอบ ด้วย เครื่องบันทึกอุณหภูมิ Supcon R3000/4000 series Recorder และ อ่านค่าระดับความสูง แยกต่างของน้ำในมานอมิเตอร์หลอดแก้วด้วย เพื่อวิเคราะห์ค่าการสูญเสียเนื่องมาจากความเสียดทาน ภายในท่อ
3. ปรับอัตราไหลของน้ำร้อนเพิ่มขึ้นตามที่กำหนด จาก 300 ลิตร/ชั่วโมง จนถึง 1,100 ลิตร/ชั่วโมง และทำตามขั้นตอนในข้อ 2. จนครบทุกช่วงการไหล หลังจากนั้น นำผลที่ได้ไป วิเคราะห์ผลการถ่ายเทความร้อน และ และความเสียดทานในช่วงอัตราการไหลต่าง ๆ
4. เมื่อทำการทดลองท่อชั้นในแบบเรียบ แล้ว เปลี่ยนท่อชั้นในเป็นแบบที่มีรอยบุ๋มที่ระยะ รอยบุ๋ม S เท่ากับ 0.7 และ 1.0 และระยะรอยบุ๋ม Z เท่ากับ 0.7 และ 1.0 พร้อมกันกับการใส่ไบบิต ค่า y เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ แล้วทำตามขั้นตอนจากข้อ 1. ถึงข้อ 3. จนครบขอบเขตการ ทดลอง

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

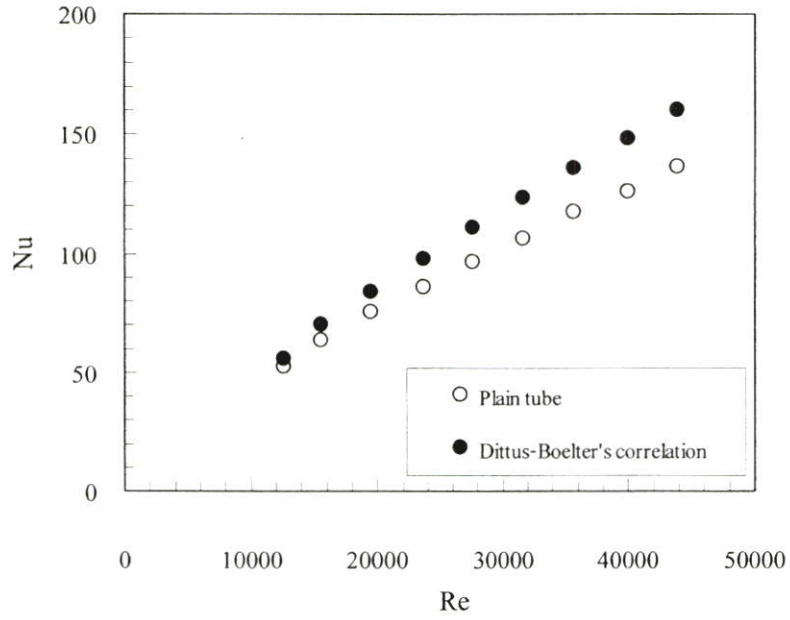
บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน จากการทดลองสร้างรอยบวมที่ผิวท่อชั้นใน ทั้งในแนวตรงและแนวสลับ ที่อัตราส่วนระยะรอยบวมแบบแนวตรง S และอัตราส่วนระยะรอยบวมแบบแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 และ 1.0 ตามลำดับ ร่วมกับการใส่ไบบิตเต็ม ที่อัตราส่วนการบิด เท่ากับ 3, 5 และ 7 โดยจะทำการทดลองในกรณีท่อชั้นในเป็นท่อเปล่า เปรียบเทียบกับทฤษฎีด้วย ซึ่งผลการทดลองแยกพิจารณาในแต่ละกรณีดังนี้

#### 5.1 กรณีท่อเปล่าผิวเรียบ

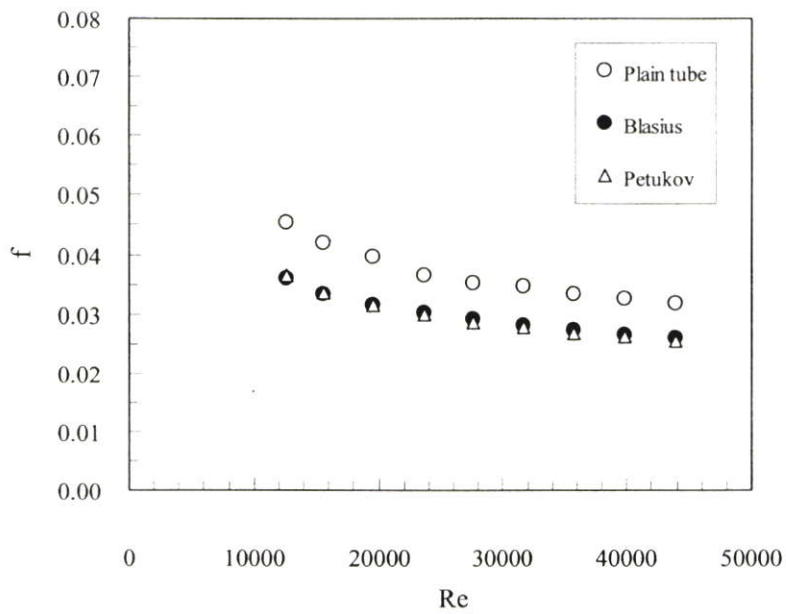
ในการศึกษาจะทดลองหาค่าการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในท่อเปล่าผิวเรียบ โดยอาศัยวิธีการ Wilson plot method แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีเพื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อน และรูปแบบของการทดลองทำให้ผลการทดลองออกมาเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบได้ดังนี้

รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ Nu ของท่อเรียบกับสหพันธ์ของ Dittus-Boelter ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง ซึ่งอยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนทุกช่วงการทดลอง ( $10,000 < Re < 45,000$ ) ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าความคลาดเคลื่อนกับทฤษฎีประมาณ 13.7 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Re กับ f ของท่อเรียบกับสหพันธ์ของ Blasius และ Petukov ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนกับทฤษฎีประมาณ 18.8 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $Re$  สำหรับท่อเปล่าผิวเรียบ



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $f$  สำหรับท่อเปล่าผิวเรียบ

## 5.2 กรณีท่อที่มีรอยนูน

จากการทดลอง สามารถเปรียบเทียบระหว่างกรณีท่อเปล่าผิวเรียบกับท่อที่มีการสร้างรอยนูนที่อัตราระยะรอยนูน สำหรับแนวตรงและแนวสลับ S และ Z แบบต่างๆ ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

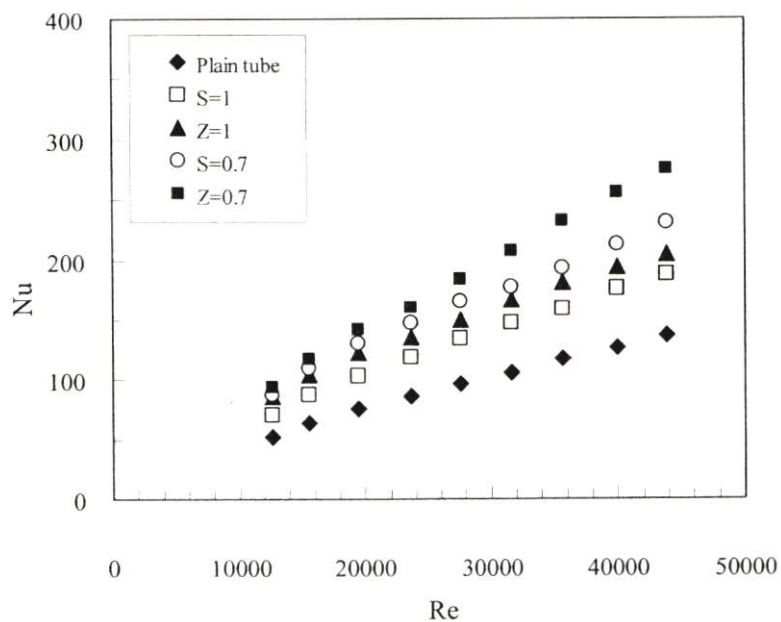
รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $Re$  สำหรับท่อเปล่าและท่อที่มีการสร้างรอยนูน จำนวน 4 แถว ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางรอยนูน 3 มม. และความลึก 2 มม. จัดวางรอยนูนแบบแนวตรง มีค่า S เท่ากับ 0.7 และ 1.0 ตามลำดับ และการจัดวางรอยนูนแบบแนวสลับ มีค่า Z เท่ากับ 0.7 และ 1.0 ตามลำดับเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะพบว่าเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นค่า  $Nu$  จะเพิ่มขึ้นและท่อทดสอบที่มีรอยนูน ที่  $Z = 0.7, S = 0.7, Z = 1.0$  และ  $S = 1.0$  จะมีค่า  $Nu$  เพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าประมาณ 103 %, 72 %, 64 % และ 40 % ตามลำดับ

รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับอัตราส่วน  $Nu$  ระหว่างท่อเปล่าและท่อที่มีการสร้างรอยนูน ( $Nu/Nu_0$ ) ที่ค่า S และ Z เท่ากับ 0.7 และ 1.0 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะพบว่าท่อทดสอบที่มีรอยนูน ที่  $Z = 0.7, S = 0.7, Z = 1.0$  และ  $S = 1.0$  จะมีค่า  $Nu$  เพิ่มขึ้นสูงกว่าท่อเปล่าโดยเฉลี่ยประมาณ 1.97 เท่า, 1.69 เท่า, 1.56 เท่า และ 1.37 เท่าตามลำดับ

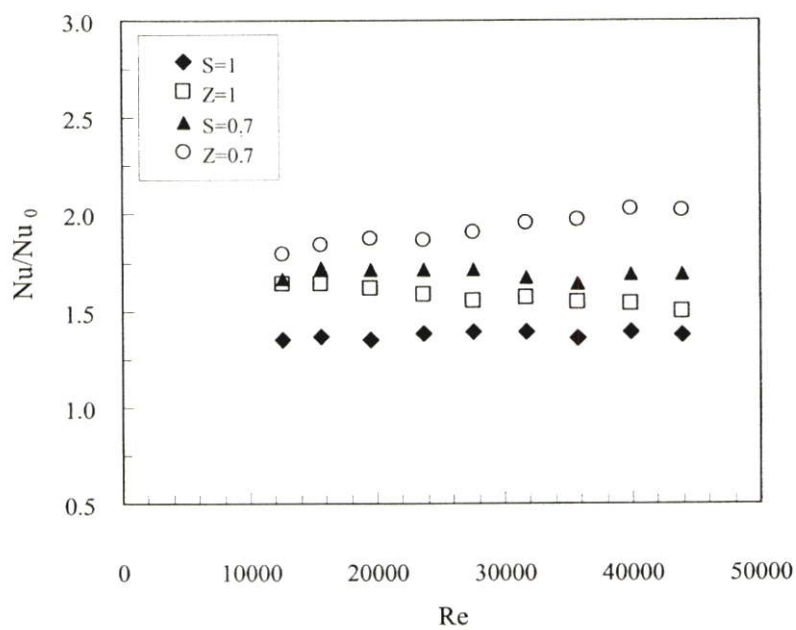
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f$  สำหรับท่อเปล่าและท่อที่มีการสร้างรอยนูน จำนวน 4 แถว ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางรอยนูน 3 มม. และความลึก 2 มม. จัดวางรอยนูนแบบแนวตรง มีค่า S เท่ากับ 0.7 และ 1.0 ตามลำดับ และการจัดวางรอยนูนแบบแนวสลับ มีค่า Z เท่ากับ 0.7 และ 1.0 ตามลำดับเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะพบว่าเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นค่า  $f$  จะลดลง และท่อทดสอบที่มีรอยนูน ที่  $Z = 0.7, S = 0.7, Z = 1.0$  และ  $S = 1.0$  จะมีค่า  $f$  สูงกว่าท่อเปล่าตามลำดับ

รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับอัตราส่วน  $f$  ระหว่างท่อเปล่าและท่อที่มีการสร้างรอยนูน ( $f/f_0$ ) ที่ค่า S และ Z เท่ากับ 0.7 และ 1.0 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะพบว่าท่อทดสอบที่มีรอยนูน ที่  $Z = 0.7, S = 0.7, Z = 1.0$  และ  $S = 1.0$  จะมีค่า  $f$  โดยเฉลี่ยสูงกว่าท่อเรียบประมาณ 2.37 เท่า, 2.34 เท่า, 2.21 เท่า และ 1.93 เท่าตามลำดับ

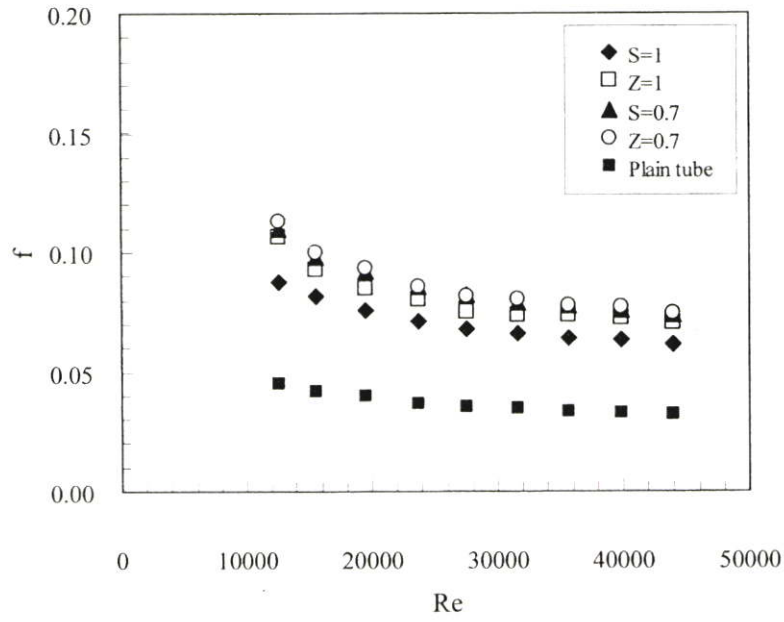
รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $\eta$  ประสิทธิภาพของการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนพิจารณาที่การสูญเสียกำลังเนื่องจากการไหลเท่านั้น สำหรับท่อทดสอบที่มีการสร้างรอยนูน ที่ค่า S และ Z เท่ากับ 0.7 และ 1.0 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงผล จะพบว่าท่อทดสอบ ที่มีค่า  $Z = 0.7, S = 0.7, Z = 1.0$  และ  $S = 1.0$  จะมีค่าประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) โดยเฉลี่ยประมาณ 1.44, 1.27, 1.21 และ 1.10 ตามลำดับ



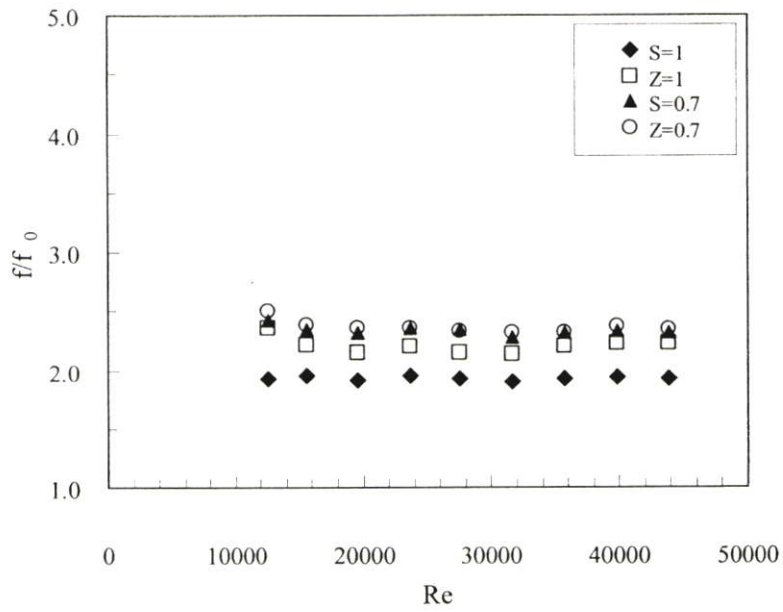
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu กรณีท่อที่มีรอยขุ่น



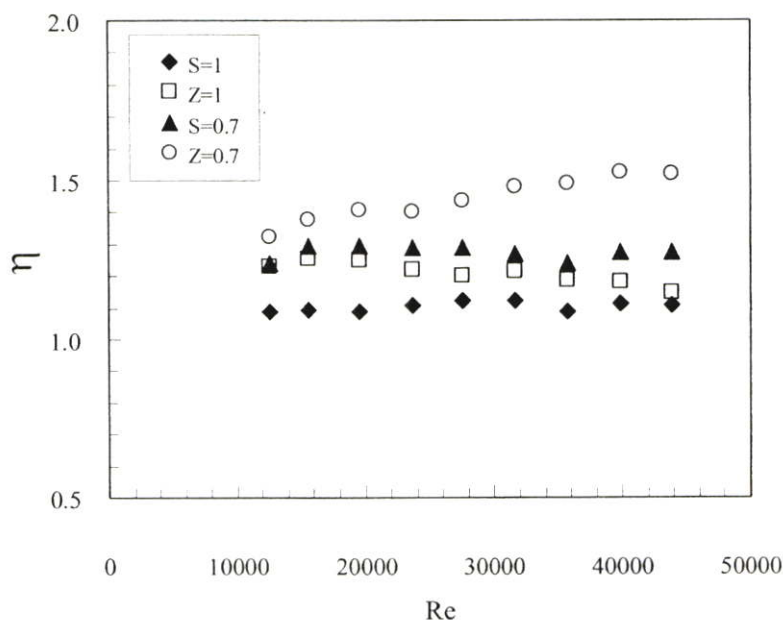
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $Nu/Nu_0$  กรณีท่อที่มีรอยขุ่น



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f$  กรณีท่อที่มีรอยบุ๋ม



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f/f_0$  กรณีท่อที่มีรอยบุ๋ม



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) กรณีท่อที่มีรอยนูน

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ท่อเปล่าและท่อทดสอบที่ทำการสร้างรอยนูน จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น ตามตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำร้อนไหลในท่อชั้นในที่สูงขึ้น เป็นผลจากเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่ม การไหลปั่นป่วนมากขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น และจากผลการทดลองพบว่า ท่อทดสอบจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงกว่าท่อเปล่า ในทุกกรณีและทุกช่วงการไหลที่ทำการทดลอง เนื่องจากเมื่อผิวท่อขรุขระจากรอยนูน ก็จะทำให้เพิ่มความปั่นป่วนให้มากขึ้นจากการรบกวนการไหลรอบ ๆ ผิวท่อ เป็นการทำลายชั้นขีดผิวซึ่งถือเป็นชั้นต้านทานความร้อนให้บางลง ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นกว่าการไหลในท่อเปล่าผิวเรียบ โดยจากผลการทดลองจะเห็นว่า ลักษณะการจัดวางแนวรอยนูน และ ระยะห่างรอยนูนมีผลโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน โดย ระยะห่างรอยนูนที่ชิดกันมากกว่า จะให้ผลการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า การวางระยะห่างที่มากขึ้น และการวางแนวรอยนูน แบบ 4 แถว ในแนวสลับ จะให้ผลการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่า รอยนูนแบบ 4 แถว ในแนวตรง ผลการทดลองกรณีรอยนูนแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 จะมีค่าตัวเลขนัสเซิลต์สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับรอยนูนแบบอื่น ๆ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการทดลอง จะเห็นว่าในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ ๆ หรืออัตราการไหลต่ำ จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงและเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานก็มีค่าลดลง โดยที่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระยะรอยนูนที่ชิดกันมากกว่าและการวางรอยนูนแนวสลับ ก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นได้

มากกว่าด้วยเช่นกัน ดังเช่นผลการทดลองที่กรณีรอบมุม  $Z$  เท่ากับ 0.7 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด อย่างไรก็ตามจากผลการทดลอง ซึ่งให้เห็นว่ากรณีรอบมุม  $Z$  เท่ากับ 0.7 ก็ยังมีค่าประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด

### 5.3 กรณีท่อเปล่ากับการใส่ไบบิต $Y=3, 5$ และ $7$

การเปรียบเทียบระหว่างกรณีท่อเปล่าผิวเรียบร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  ต่างๆ สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

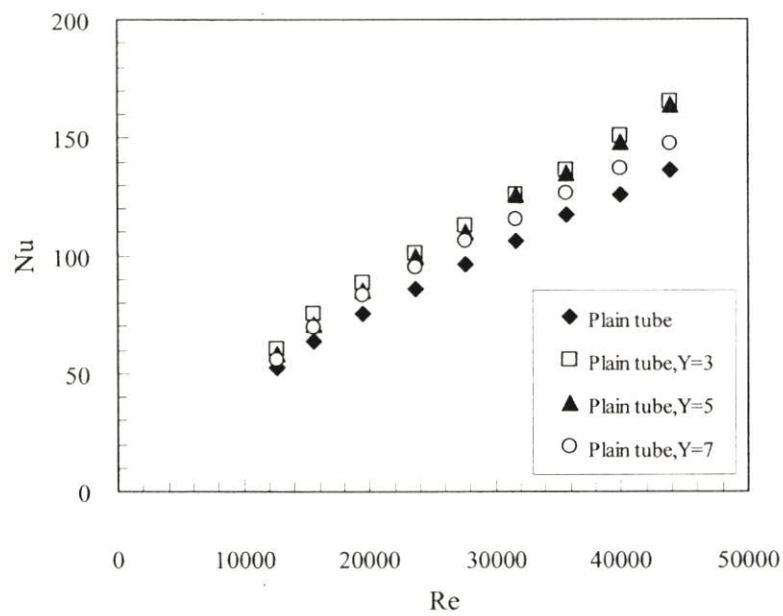
รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $Re$  สำหรับท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบิตแผ่นอลูมิเนียมบาง ความกว้างไบบิต 12 มม. มีค่าอัตราส่วนการบิด  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการทดลองแล้วจะเห็นว่าเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นค่า  $Nu$  จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อค่าอัตราส่วนการบิดลดลงหรือการบิดตัวเพิ่มขึ้น ค่า  $Nu$  จะเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน และท่อทดสอบที่เป็นท่อเปล่าผิวเรียบร่วมกับการใส่ไบบิตเต็มช่วงส่วนทดสอบ ที่มีค่า  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่า  $Nu$  สูงที่สุดโดยมีค่าสูงกว่ากรณีการใส่ไบบิตที่มีค่า  $Y$  เท่ากับ 5, 7 และกรณีท่อเปล่าที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิตตามลำดับ

รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ อัตราส่วนระหว่าง  $Nu$  ในกรณีท่อทดสอบที่ทำการใส่ไบบิตมีค่าอัตราส่วนการบิด  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ กับ  $Nu_0$  ในกรณีท่อเปล่า ( $Nu/Nu_0$ ) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง แล้วจะเห็นว่าท่อทดสอบที่เป็นท่อเปล่า ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่มีค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $Nu$  โดยเฉลี่ยสูงกว่าท่อเปล่าที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต ประมาณ 1.18 เท่า, 1.15 เท่า และ 1.10 เท่า ตามลำดับ

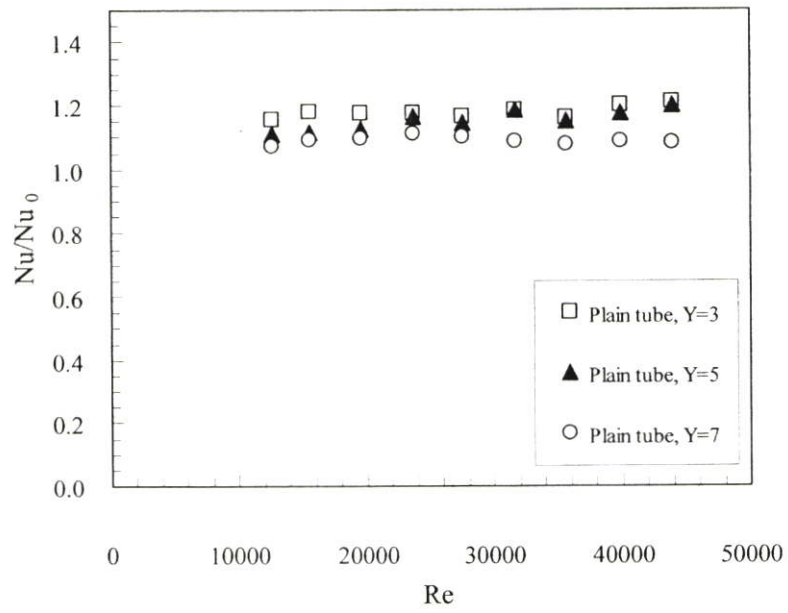
รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $f$  สำหรับท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบิตเต็มที่มีค่าอัตราส่วนการบิด  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่า เมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นค่า  $f$  จะลดลง และท่อทดสอบที่เป็นท่อเปล่าผิวเรียบร่วมกับการใส่ไบบิต ที่มีค่า  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่า  $f$  สูงที่สุดโดยมีค่าสูงกว่ากรณีการใส่ไบบิตที่มีค่า  $Y$  เท่ากับ 5, 7 และกรณีท่อเปล่าที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต ตามลำดับ

รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ อัตราส่วนระหว่าง  $f$  ในกรณีท่อทดสอบที่ทำการใส่ไบบิตมีค่าอัตราส่วนการบิด  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ กับ  $f_0$  ในกรณีท่อเปล่า ( $f/f_0$ ) เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะพบว่า ท่อทดสอบที่เป็นท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบิต จะมีค่า  $f$  โดยเฉลี่ยสูงกว่าท่อเปล่า ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ โดยมีค่ามากกว่าประมาณ 2.61 เท่า, 2.14 เท่า และ 2.00 เท่า ตามลำดับ

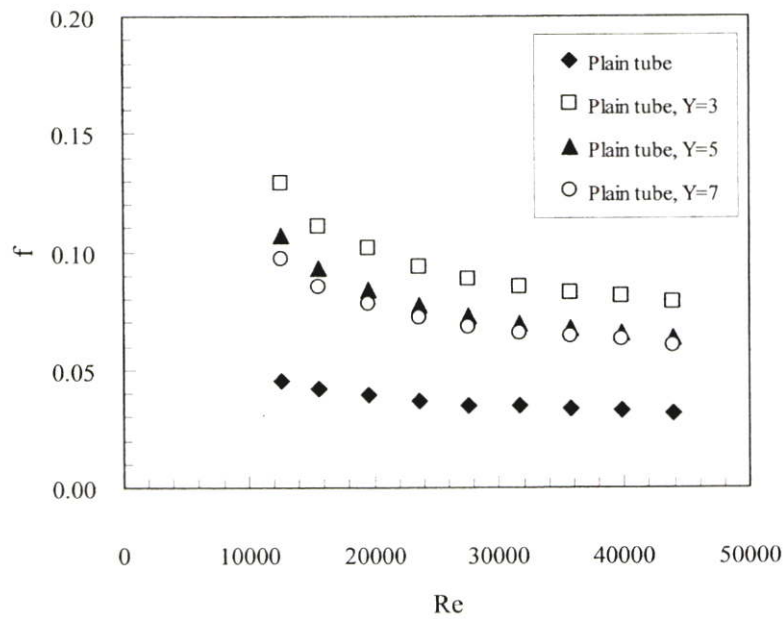
รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $\eta$  ประสิทธิภาพของการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนพิจารณาที่การสูญเสียกำลังเนื่องจากการไหลเท่านั้น ของท่อเปล่าผิวเรียบรวมกับการใส่ไบบิต มีค่าอัตราส่วนการบิด  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จากผลการทดลองแล้วจะพบว่า ท่อทดสอบที่เป็นท่อเปล่าผิวเรียบรวมกับการใส่ไบบิต ที่มีค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $\eta$  โดยเฉลี่ยประมาณ 0.86, 0.89 และ 0.87 ตามลำดับ



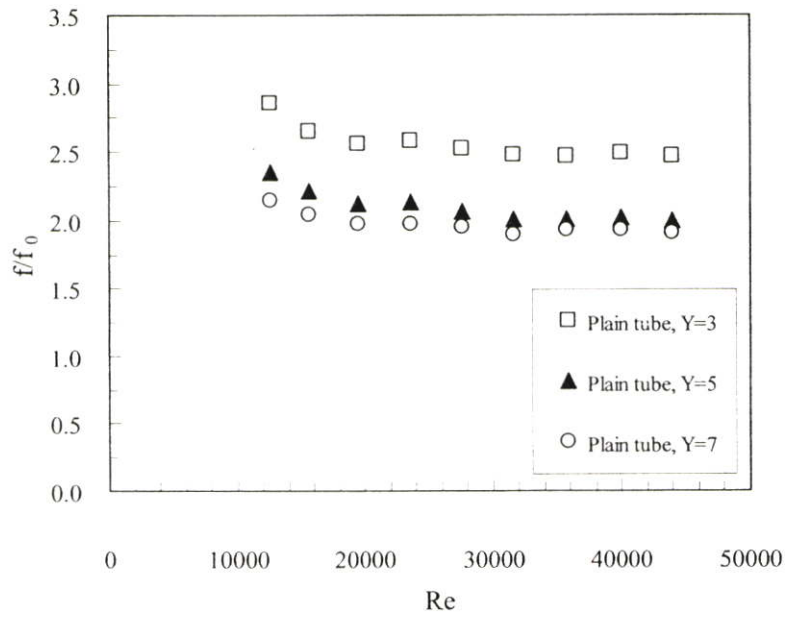
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $Nu$  กรณีท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบิต



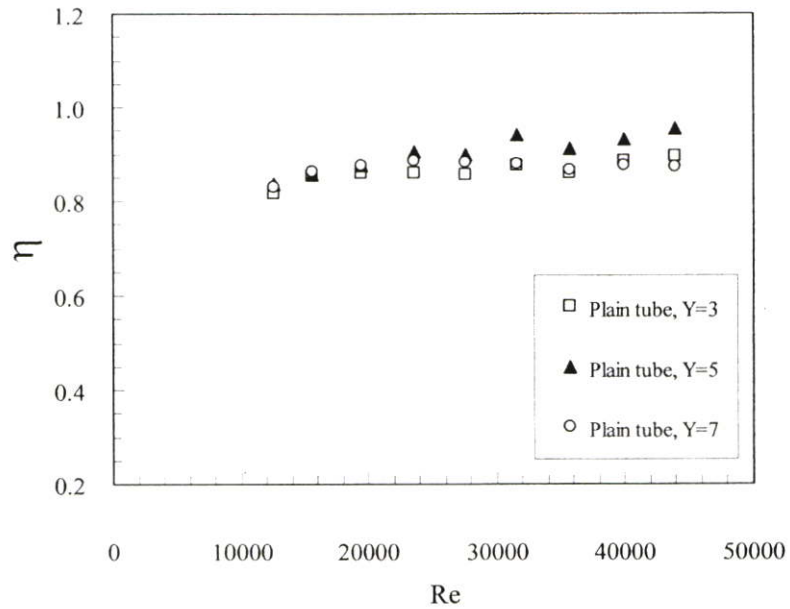
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $Nu/Nu_0$  กรณีท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบิต



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f$  กรณีท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบิต



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $f/f_0$  กรณีท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบิต



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $\eta$  กรณีท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบิต

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ในกรณีท่อเปล่าที่ไม่ได้ใส่ไบบิต และท่อที่ทำการใส่ไบบิต จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำร้อนสูงขึ้นตามการปรับเพิ่มอัตราการไหลของน้ำร้อน และจากผลการทดลองจะเห็นว่า ท่อทดสอบที่ทำการใส่ไบบิต จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงกว่าท่อเปล่าในทุกช่วงการไหลที่ทำการทดลอง เนื่องจากกระแสการไหลในท่อเมื่อกระทบผิวไบบิตที่มีลักษณะเกลียวตลอดช่วง จะทำให้เกิดการไหลหมุนวนเพิ่มความปั่นป่วน การไหลกระทบผนังท่อได้ดีขึ้น เป็นการทำลายชั้นขีดผิวซึ่งถือเป็นชั้นต้านทานความร้อนให้บางลงและการหมุนวนช่วยหน่วงเวลาการไหลผ่านชุดทดสอบให้นานขึ้น ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นกว่าการไหลในท่อเปล่า โดยจากผลการทดลองพบว่าอัตราการบิดตัวของไบบิต มีผลโดยตรงกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยไบบิตที่มีอัตราการบิดตัวมากกว่า จะให้ผลการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า โดยที่กรณีท่อที่ทำการใส่ไบบิต ที่อัตราส่วนการบิดตัว  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่าตัวเลขนัสเซิลท์ สูงกว่าที่  $Y$  เท่ากับ 5, 7 และกรณีท่อเปล่าที่ไม่ได้ใส่ไบบิต ตามลำดับ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการทดลอง จะเห็นว่าในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ จะมีค่าสูงและเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานก็มีค่าลดลง และพบว่ากรณีท่อที่ทำการใส่ไบบิต ที่อัตราส่วนการบิดตัว  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าที่  $Y$  เท่ากับ 5, 7 และกรณีท่อเปล่าที่ไม่ได้ใส่ไบบิต ตามลำดับ อันเนื่องมาจากอัตราส่วนการบิดตัวมากกว่า จะรบกวนด้านทานการไหลได้มากกว่า

#### 5.4 กรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิต $Y$ เท่ากับ 3, 5, 7

##### 5.4.1 กรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวตรง $S$ เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต $Y$ เท่ากับ 3, 5, 7

จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบระหว่างกรณีท่อที่มีการสร้างรอยบุ๋มที่จัดวางในแนวตรง ที่อัตราระยะรอยบุ๋ม  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5, 7ตามลำดับ ซึ่งอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

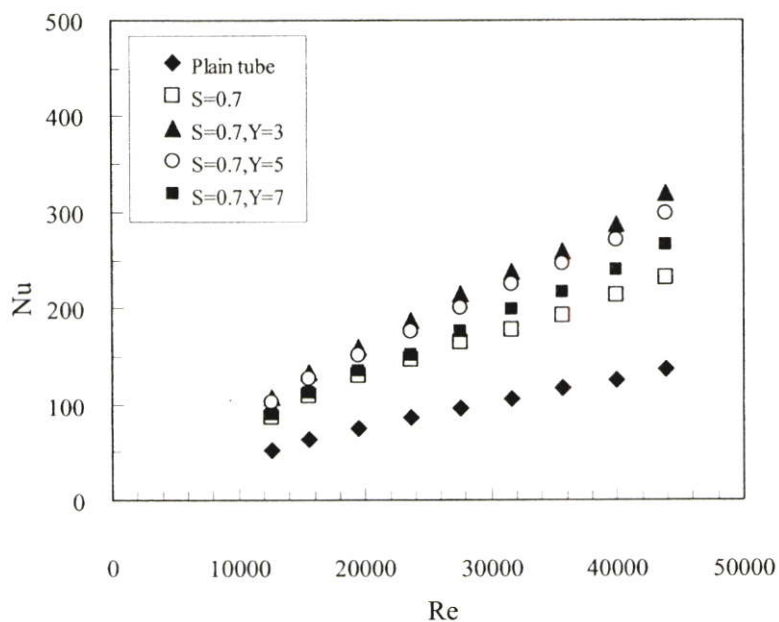
รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $Re$  สำหรับท่อที่มีรอยบุ๋มแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 และร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งพิจารณาผลการทดลองแล้ว จะเห็นว่า เมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่ปรับเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า  $Nu$  เพิ่มสูงขึ้น โดยกรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่า  $Nu$  เพิ่มขึ้นสูงที่สุด และมีค่ามากกว่า ในกรณีร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 5, 7 และในกรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต ตามลำดับ

รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับอัตราส่วนระหว่าง  $Nu$  ในกรณีท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ กับค่า  $Nu_0$  ในกรณีท่อเปล่า ( $Nu/Nu_0$ ) ซึ่งจากการพิจารณาจากกราฟแสดงผล จะเห็นว่าในกรณีท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 และในกรณีที่ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $Nu$  โดยเฉลี่ยสูงกว่าในกรณีท่อเปล่าผิวเรียบ ประมาณ 1.69 เท่า, 2.21 เท่า, 2.09 เท่า และ 1.84 เท่า ตามลำดับ

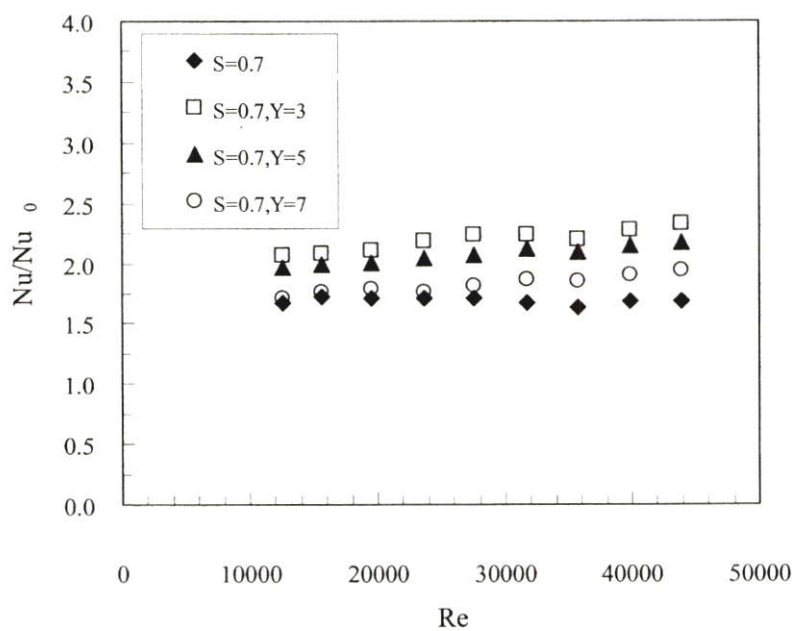
รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $f$  สำหรับท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่า เมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นค่า  $f$  จะค่อย ๆ ลดลง และกรณีท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $f$  มากกว่ากรณีท่อเปล่า โดยในกรณีร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่า  $f$  สูงสุด

รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับอัตราส่วน  $f$  ระหว่างท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ กับ  $f_0$  ในกรณีท่อเปล่า ( $f/f_0$ ) จากการพิจารณาจากกราฟจะพบว่า ท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 และในกรณีที่ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $f$  โดยเฉลี่ยสูงกว่าท่อเปล่าผิวเรียบประมาณ 2.34 เท่า, 4.79 เท่า, 4.23 เท่า และ 3.98 เท่าตามลำดับ

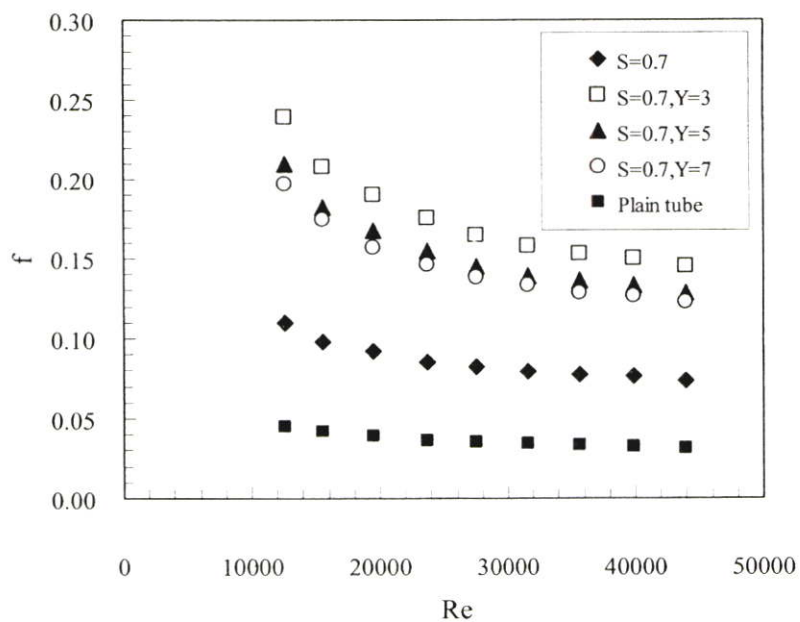
รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $\eta$  ประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนพิจารณาที่การสูญเสียกำลังการไหลเท่ากัน ของท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 และในกรณีที่ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ เมื่อพิจารณากราฟแสดงผล จะเห็นว่า มีค่า  $\eta$  โดยเฉลี่ยประมาณ 1.27, 1.30, 1.28 และ 1.15 ตามลำดับ



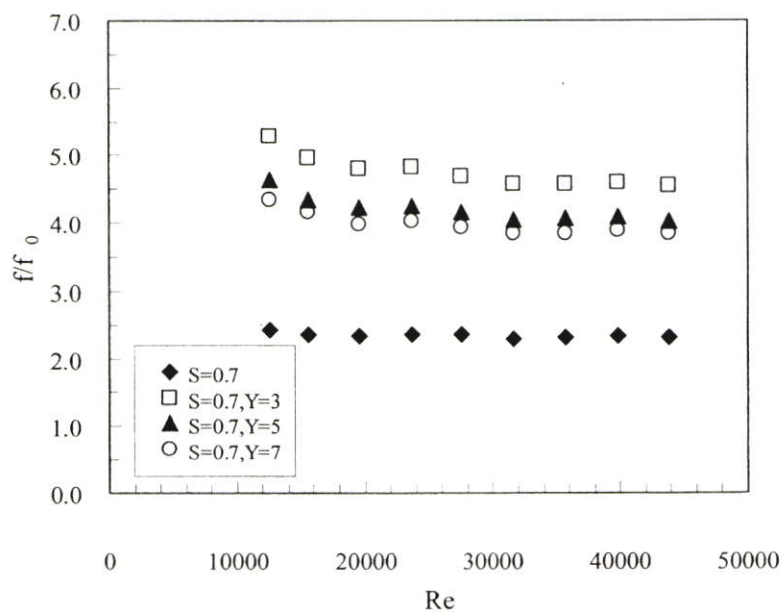
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu กรณีท่อรอยนูน  $S=0.7$  ร่วมกับการใส่ใบบิด



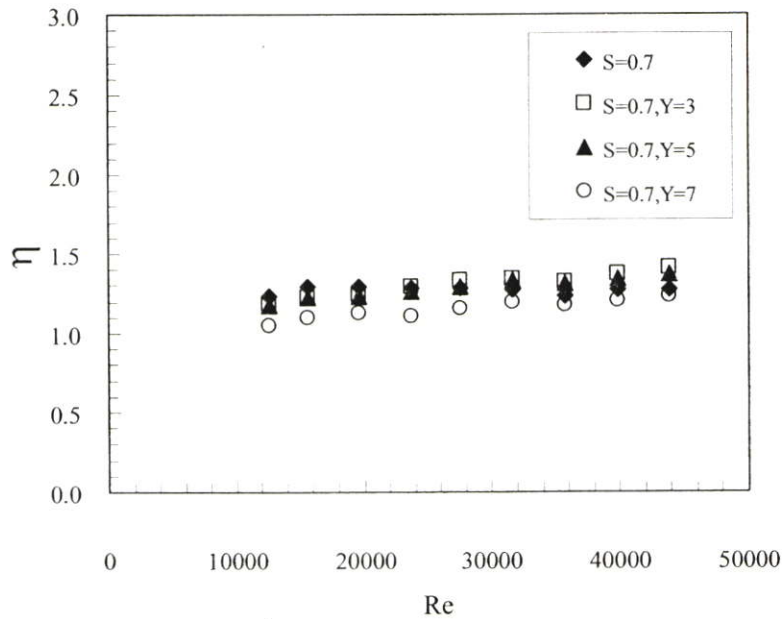
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $Nu/Nu_0$  กรณีท่อรอยนูน  $S=0.7$  ร่วมกับการใส่ใบบิด



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $f$  กรณีท่อร้อยมุม  $S=0.7$  ร่วมกับการใส่ไบบิต



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $f/f_0$  กรณีท่อร้อยมุม  $S=0.7$  ร่วมกับการใส่ไบบิต



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $\eta$  กรณีท่อรอยนุ้ม  $S=0.7$  ร่วมกับการใส่ใบบิด

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ท่อทดสอบที่มีรอยนุ้มนาน 4 แถว วางรอยนุ้มนในแนวตรงมีอัตราระยะรอยนุ้มน  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ใบบิด ที่ค่าอัตราการบิด  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น จากการปรับเพิ่มอัตราการไหลน้ำร้อน เป็นผลเนื่องมาจากตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่ม การไหลปั่นป่วนมากขึ้น การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น และจากผลการทดลองจะพบว่าท่อทดสอบที่มีรอยนุ้มนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ใบบิด จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น มากกว่าในกรณีท่อรอยนุ้มนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ที่ไม่ได้ทำการใส่ใบบิดร่วมด้วย เนื่องจากเมื่อน้ำร้อนไหลกระทบผิวใบบิดที่มีลักษณะเกลียวต่อเนื่อง ดัดตั้งที่กลางท่อตลอดแนวความยาวส่วนทดสอบ จะทำให้เกิดการไหลหมุนวนเพิ่มความปั่นป่วน และหน่วงเวลาการไหลผ่านชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้นานขึ้น และเมื่อเกิดการไหลหมุนวน เป็นผลให้ของไหลกระทบผิวนิ่งท่อได้ดีขึ้น ซึ่งเมื่อร่วมกับที่ผิวท่อที่มีลักษณะพื้นผิวขรุขระจากการสร้างรอยนุ้มน จะยิ่งช่วยเพิ่มความปั่นป่วนการไหลได้มากขึ้น ทำให้เพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่ากรณีท่อรอยนุ้มนที่ไม่ได้ทำการใส่ใบบิด และจากผลการทดลอง จะพบว่ากรณีท่อทดสอบที่มีรอยนุ้มนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ใบบิด ที่ค่าอัตราการบิด  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่าตัวเลขนัสเซิลท์สูงที่สุด สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการทดลอง จะเห็นว่าในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ จะมีค่าสูงและเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานก็มีค่าลดต่ำลง และพบว่าท่อทดสอบที่มีรอยนุ้มนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ใบบิด  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าที่  $Y$  เท่ากับ

5, 7 และกรณีท่อร้อยบูมแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต ตามลำดับ อันเนื่องมาจากอัตราส่วนการบิดตัวมากกว่า จะรบกวนด้านทานการไหลให้ของไหลผ่านได้ลำบากมากยิ่งขึ้น

#### 5.4.2 กรณีท่อที่มีรอยบูมแนวตรง $S$ เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต $Y$ เท่ากับ 3, 5, 7

จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกรณีท่อที่มีการสร้างรอยบูมที่จัดวางในแนวตรง ที่อัตราระยะรอยบูม  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $Re$  สำหรับท่อที่มีรอยบูมแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 และร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งพิจารณาผลการทดลองแล้วจะเห็นว่า เมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า  $Nu$  เพิ่มขึ้น โดยกรณีท่อที่มีรอยบูมแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่า  $Nu$  เพิ่มขึ้นสูงที่สุด และมีค่ามากกว่า ในกรณีร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 5, 7 และในกรณีท่อที่มีรอยบูมแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต ตามลำดับ

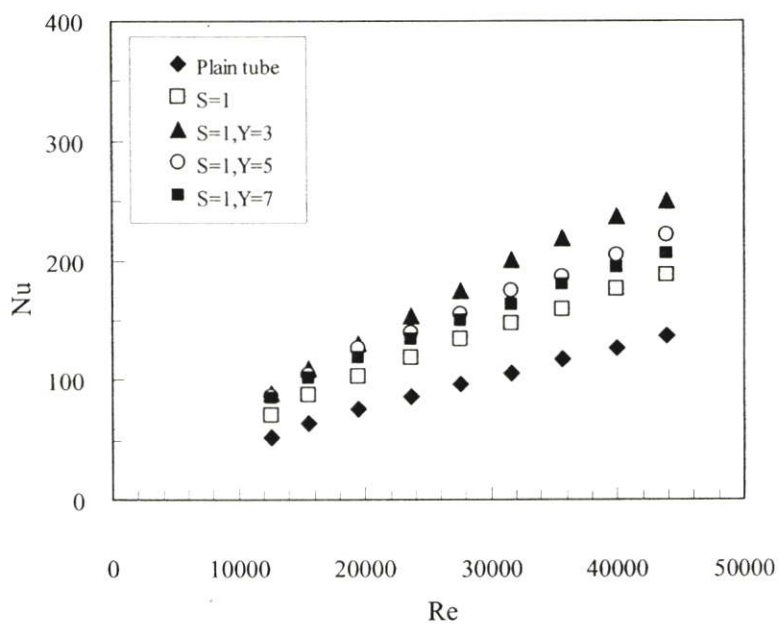
รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับอัตราส่วนระหว่าง  $Nu$  ในกรณีท่อทดสอบที่มีรอยบูมแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ กับค่า  $Nu_0$  ในกรณีท่อเปล่า ( $Nu/Nu_0$ ) ซึ่งจากการพิจารณาจากกราฟแสดงผล จะเห็นว่าในกรณีท่อทดสอบที่มีรอยบูมแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 และในกรณีที่ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $Nu$  โดยเฉลี่ยสูงกว่าในกรณีท่อเปล่าผิวเรียบ ประมาณ 1.38 เท่า, 1.82 เท่า, 1.63 เท่า และ 1.55 เท่า ตามลำดับ

รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $f$  สำหรับท่อทดสอบที่มีรอยบูมแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่า เมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นค่า  $f$  จะค่อย ๆ ลดลง และกรณีท่อทดสอบที่มีรอยบูมแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $f$  มากกว่ากรณีท่อเปล่า โดยในกรณีร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่า  $f$  สูงสุด

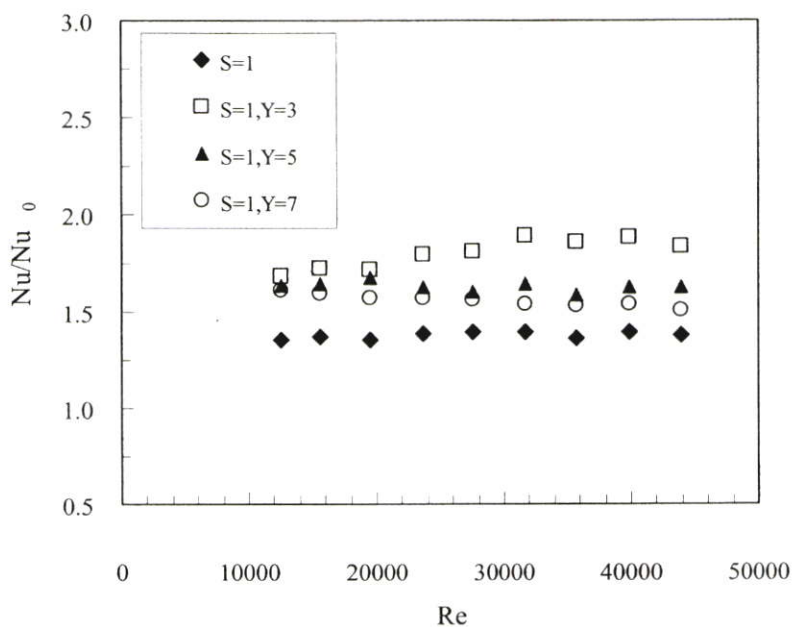
รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับอัตราส่วน  $f$  ระหว่างท่อทดสอบที่มีรอยบูมแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ กับ  $f_0$  ในกรณีท่อเปล่า ( $f/f_0$ ) จากการพิจารณาจากกราฟจะพบว่า ท่อทดสอบที่มีรอยบูมแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 และในกรณีที่ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $f$  โดยเฉลี่ยสูงกว่าท่อเปล่าผิวเรียบประมาณ 1.93 เท่า, 4.17 เท่า, 3.61 เท่า และ 3.49 เท่าตามลำดับ

รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $\eta$  ประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนพิจารณาที่การสูญเสียกำลังการไหลเท่ากัน ของท่อทดสอบที่มีรอยบูมแนวตรง  $S$  เท่ากับ

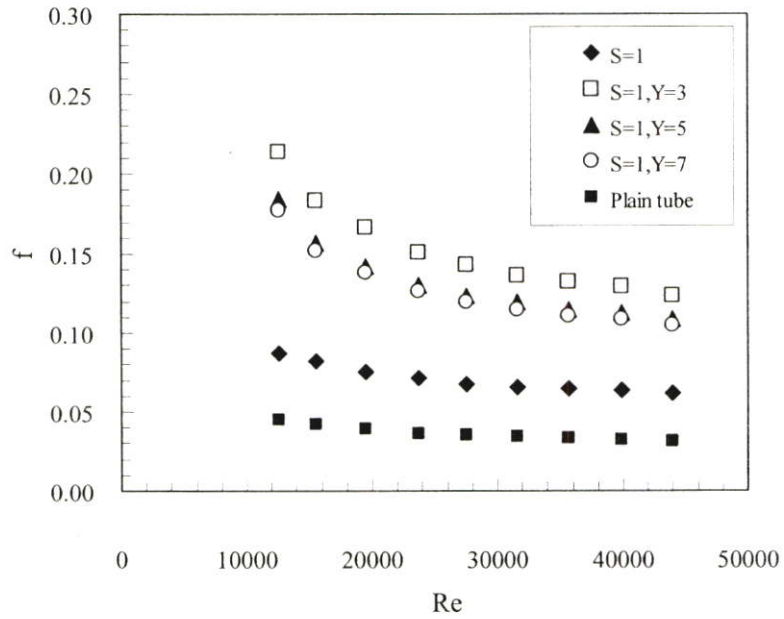
1.0 และในกรณีที่ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ เมื่อพิจารณากราฟ แสดงผล จะเห็นว่า มีค่า  $\eta$  โดยเฉลี่ยประมาณ 1.10, 1.12, 1.07 และ 1.03 ตามลำดับ



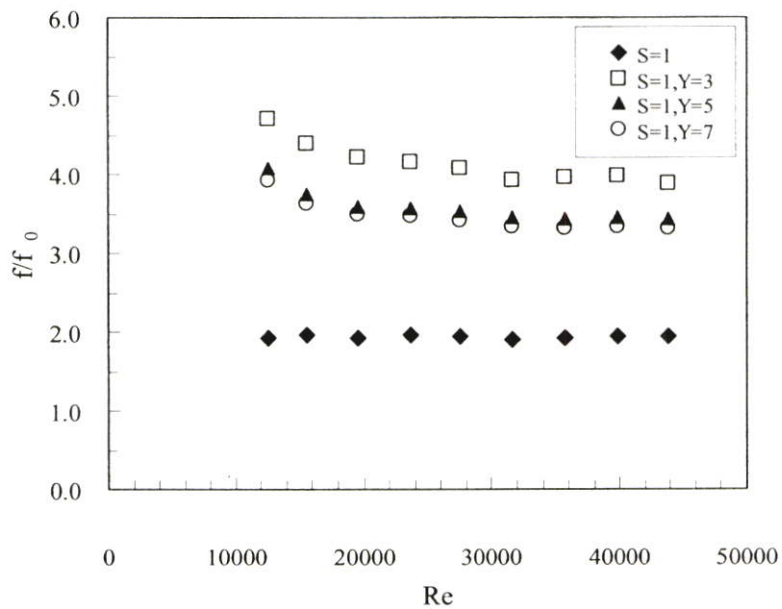
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu กรณีท่อร้อยบูม  $S = 1.0$  ร่วมกับการใส่ไบบิต



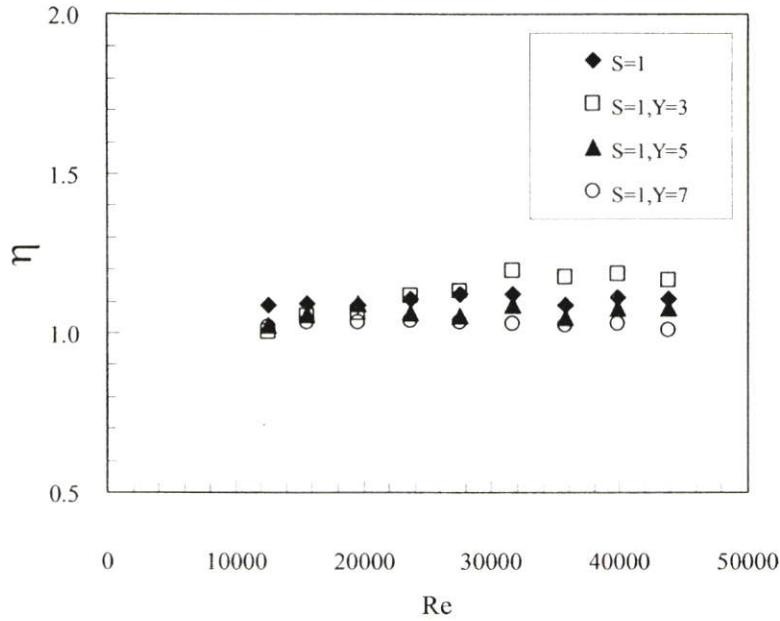
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $Nu/Nu_0$  กรณีท่อร้อยบูม  $S = 1.0$  ร่วมกับการใส่ไบบิต



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f$  กรณีท่อรอยนูน  $S = 1.0$  ร่วมกับการใส่ใบบิด



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f/f_0$  กรณีท่อรอยนูน  $S = 1.0$  ร่วมกับการใส่ใบบิด



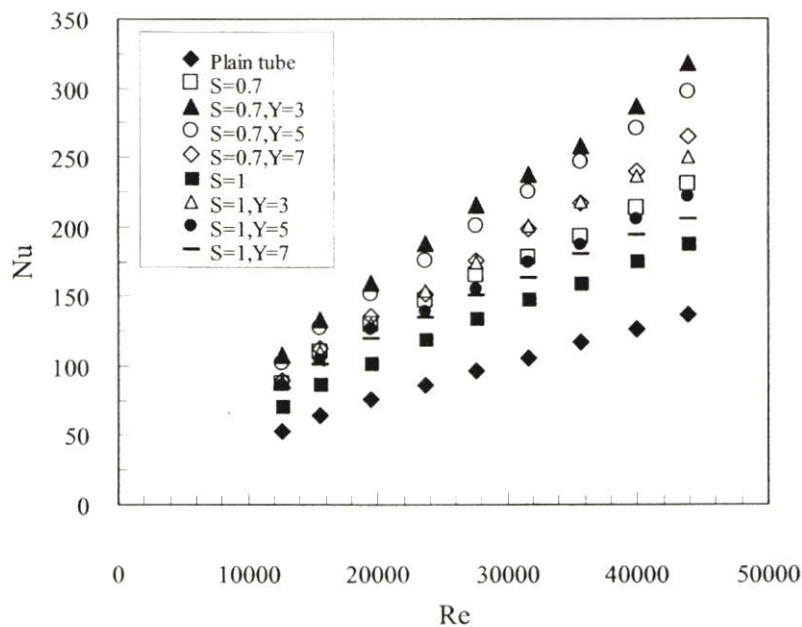
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $\eta$  กรณีท่อรอยนุ้มน  $S = 1.0$  ร่วมกับการใส่ไบบิต

จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่า ท่อทดสอบที่มีรอยนุ้มนจำนวน 4 แถว วางรอยนุ้มนในแนวตรงมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่าอัตราการบิด  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น ตามการปรับเพิ่มอัตราการไหลของน้ำร้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น การไหลปั่นป่วนมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะเพิ่มสูงขึ้น และจากผลการทดลองจะพบว่าท่อทดสอบที่มีรอยนุ้มนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิตจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงกว่าในกรณีท่อรอยนุ้มนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต เนื่องจากการไหลผ่านไบบิตที่มีลักษณะเกลียวต่อเนื่อง จะทำให้เกิดการไหลหมุนวนเพิ่มความปั่นป่วน และหน่วงเวลาการไหลผ่านชุดทดสอบให้มากขึ้น และเมื่อเกิดการเกิดการไหลหมุนวน เป็นผลให้ของไหลกระทบผิวผนังท่อได้ดีขึ้น ซึ่งประกอบกับที่ผิวท่อมีลักษณะพื้นผิวขรุขระจากการสร้างรอยนุ้มน จะยิ่งช่วยเพิ่มความปั่นป่วนการไหลได้มากขึ้น ทำให้เพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า ในกรณีที่ท่อทดสอบเป็นเพียงท่อรอยนุ้มนที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต จากผลการทดลองพบว่ากรณีท่อทดสอบที่มีรอยนุ้มนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่าอัตราการบิด  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่าตัวเลขนี้สเซลท์สูงที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า ท่อทดสอบที่มีรอยนุ้มนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต จะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้น้อยกว่าท่อทดสอบที่มีรอยนุ้มนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต

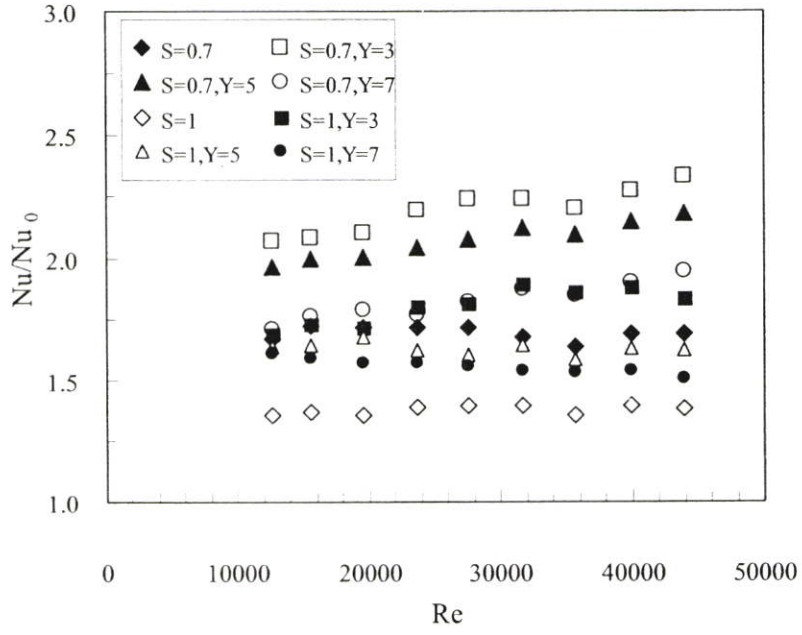
ในส่วนความเสียดทานการไหล จากผลการทดลองพบว่าในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ จะมีค่าสูงและเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานก็มีค่าลดลง และพบว่าท่อทดสอบที่มีรอยนูนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าที่  $Y$  เท่ากับ 5, 7 และกรณีท่อรอยนูนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต ตามลำดับ อันเนื่องมาจากอัตราส่วนการบิดตัวมากกว่า จะรบกวนด้านทานการไหลให้ของไหลผ่านได้ลำบากมากยิ่งขึ้น

ประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนพิจารณาที่การสูญเสียกำลังการไหลเท่ากัน พบว่ามีเพียงท่อรอยนูนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต  $Y$  เท่ากับ 3 เพียงกรณีเดียวเท่านั้น ที่มีค่าประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน มากกว่าท่อรอยนูนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต

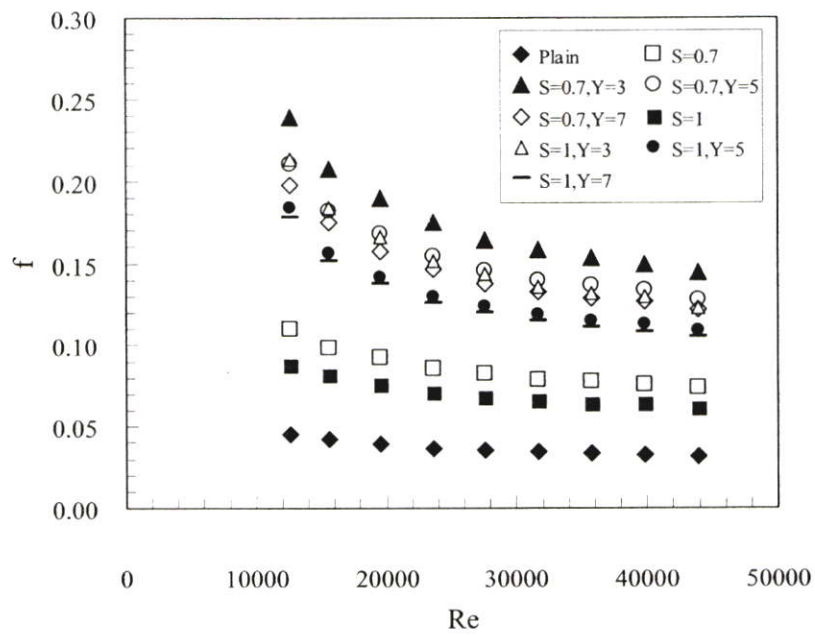
#### 5.4.3 สรุปความสัมพันธ์กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิต $Y$ เท่ากับ 3, 5, 7



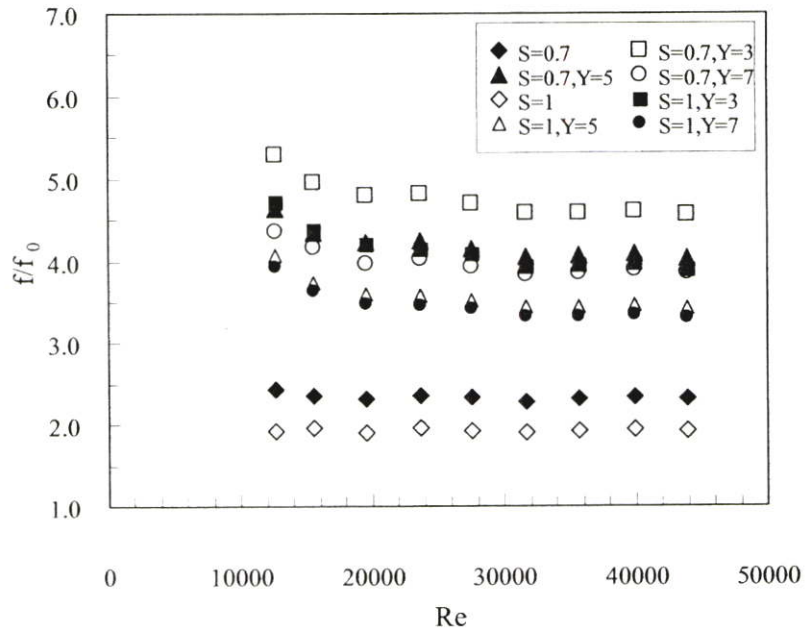
รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $Nu$  กรณีท่อรอยนูนแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิต



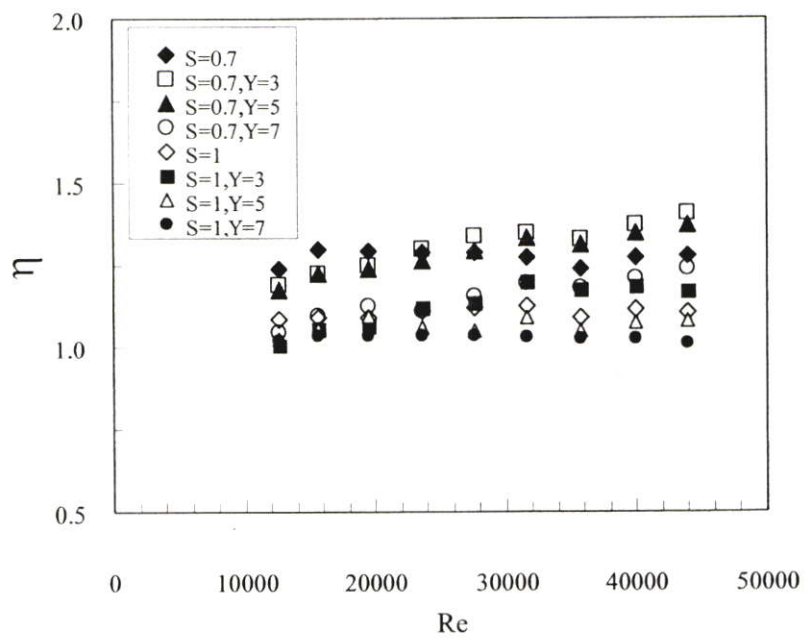
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $Nu/Nu_0$  กรณีท่อร้อยขุ่นแนวตรงร่วมกับการใส่ใบบิด



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f$  กรณีท่อร้อยขุ่นแนวตรงร่วมกับการใส่ใบบิด



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $f/f_0$  กรณีท่อร้อยนํ้าแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิด



รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $\eta$  กรณีท่อร้อยนํ้าแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิด

สรุปผลความสัมพันธ์จากการทดลอง กรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิต ทั้งหมดทุกกรณีที่ทำการศึกษา แสดงในรูปที่ 5.23 – 5.27 พบว่ากรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวตรง S เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 3 จะมีค่า Nu เพิ่มขึ้นสูงสุด มากกว่ากรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิตทั้งหมดที่ทำการศึกษา โดยมีค่า Nu เพิ่มขึ้นสูงสุด 133 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่า และมีค่า Nu โดยเฉลี่ยสูงกว่าในกรณีท่อเปล่าผิวเรียบ ประมาณ 1.69 เท่า และในกรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวตรง S เท่ากับ 1 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 7 จะมีค่า Nu เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด สำหรับผลกระทบการเพิ่มขึ้นของความเสียดทาน เมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะค่อย ๆ ลดลง และกรณีท่อทดสอบที่มีรอยบุ๋มแนวตรง S เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 3 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าทุกกรณี โดยมีค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเปรียบเทียบกับกรณีท่อเปล่า ( $f/f_0$ ) เท่ากับ 4.17 เท่า และกรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวตรง S เท่ากับ 1 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 7 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยกว่ากรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิตอื่น ๆ

ประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน  $\eta$  พิจารณาที่การสูญเสียกำลังการไหล เท่ากัน พบว่าท่อทดสอบที่มีรอยบุ๋มแนวตรง S เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y มีค่า  $\eta$  โดยเฉลี่ยสูงกว่าทุกกรณี โดยมีค่าประมาณ 1.30 และกรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวตรง S เท่ากับ 1 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 7 มีค่า  $\eta$  โดยเฉลี่ยน้อยกว่าทุกกรณี โดยมีค่าประมาณ 1.03

## 5.5 กรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต Y เท่ากับ 3, 5, 7

### 5.5.1 กรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต Y เท่ากับ 3, 5, 7

จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกรณีท่อที่มีการสร้างรอยบุ๋มที่จัดวางในแนวสลับ ที่อัตราระยะรอยบุ๋ม Z เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 3, 5, 7 ตามลำดับ ซึ่งอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

รูปที่ 5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re สำหรับท่อที่มีรอยบุ๋มแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 และร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งพิจารณาผลการทดลองแล้ว จะเห็นว่า เมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่ปรับเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า Nu เพิ่มขึ้น โดยกรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 3 จะมีค่า Nu เพิ่มขึ้นสูงสุด และมีค่ามากกว่า ในกรณีร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 5, 7 และในกรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต ตามลำดับ

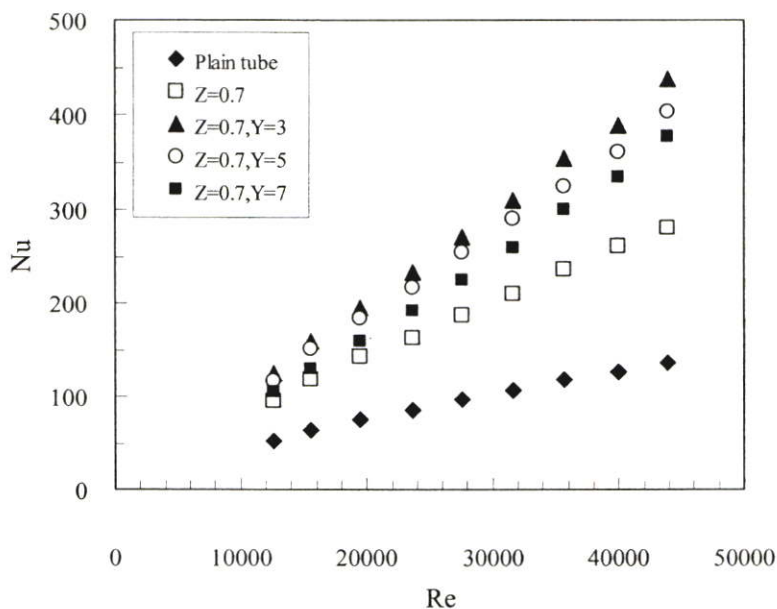
รูปที่ 5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับอัตราส่วนระหว่าง Nu ในกรณีท่อทดสอบที่มีรอยบุ๋มแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ

กับค่า  $Nu_0$  ในกรณีท่อเปล่า ( $Nu/Nu_0$ ) ซึ่งจากการพิจารณาจากกราฟแสดงผล จะเห็นว่าในกรณีท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 และในกรณีที่ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $Nu$  โดยเฉลี่ยสูงกว่าในกรณีท่อเปล่าผิวเรียบ ประมาณ 1.97 เท่า, 2.88 เท่า, 2.68 เท่า และ 2.42 เท่าตามลำดับ

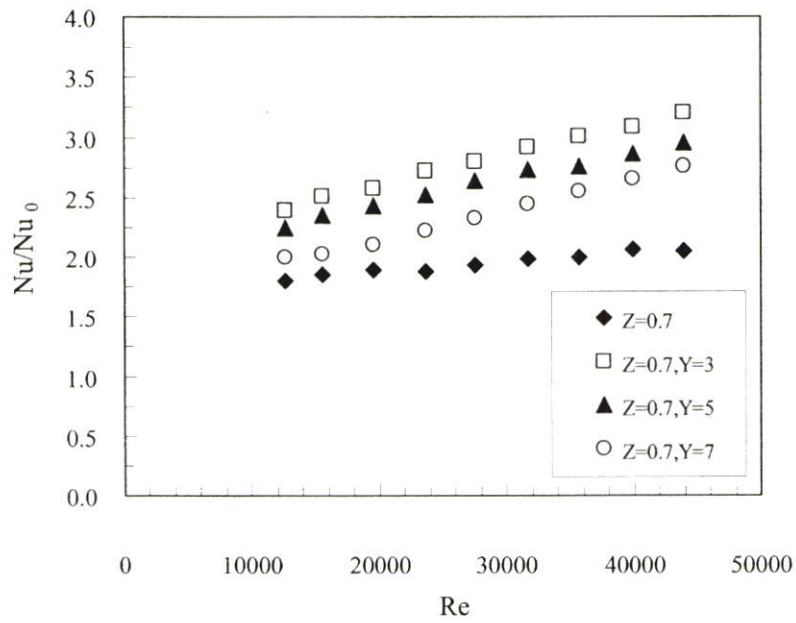
รูปที่ 5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $f$  สำหรับท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่า เมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นค่า  $f$  จะค่อย ๆ ลดลง และกรณีท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $f$  มากกว่ากรณีท่อเปล่า โดยในกรณีร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่า  $f$  สูงสุด

รูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับอัตราส่วน  $f$  ระหว่างท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ กับ  $f_0$  ในกรณีท่อเปล่า ( $f/f_0$ ) จากการพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่า ท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 และในกรณีที่ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $f$  โดยเฉลี่ยสูงกว่าท่อเปล่า ประมาณ 2.37 เท่า, 5.05 เท่า, 4.36 เท่า และ 4.10 เท่าตามลำดับ

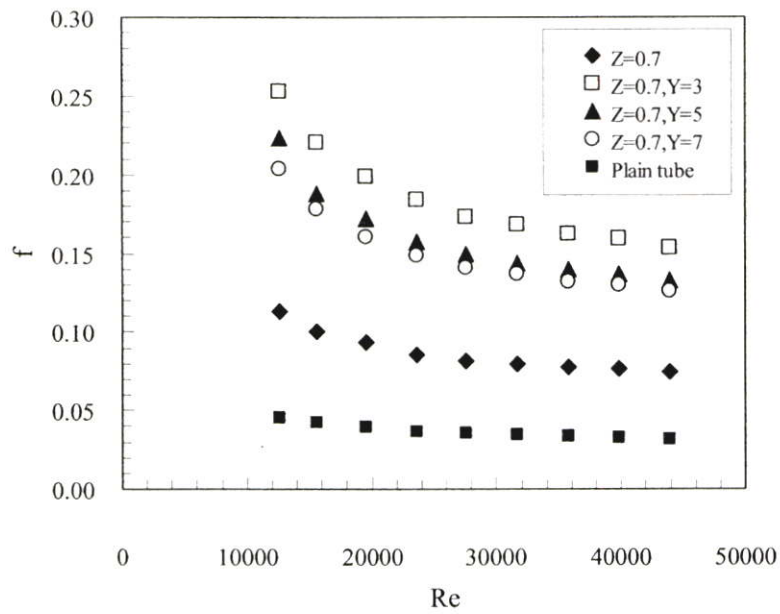
รูปที่ 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $\eta$  ประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนพิจารณาที่การสูญเสียกำลังการไหลเท่ากัน ของท่อทดสอบที่มีรอยขุ่นแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 และในกรณีที่ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ เมื่อพิจารณากราฟแสดงผล จะเห็นว่า มีค่า  $\eta$  โดยเฉลี่ยประมาณ 1.46, 1.64, 1.60 และ 1.47 ตามลำดับ



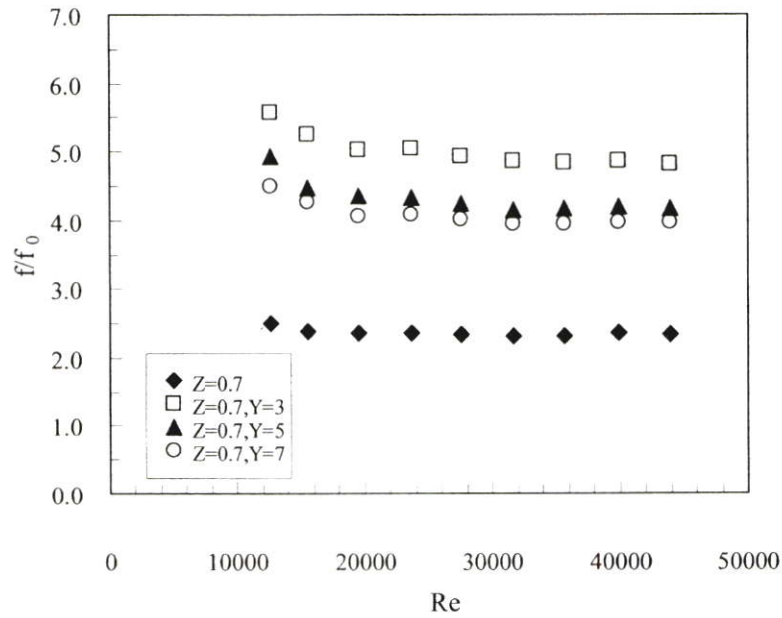
รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $Nu$  กรณีท่อรอยขุ่น  $Z = 0.7$  ร่วมกับการใส่ไบบิต



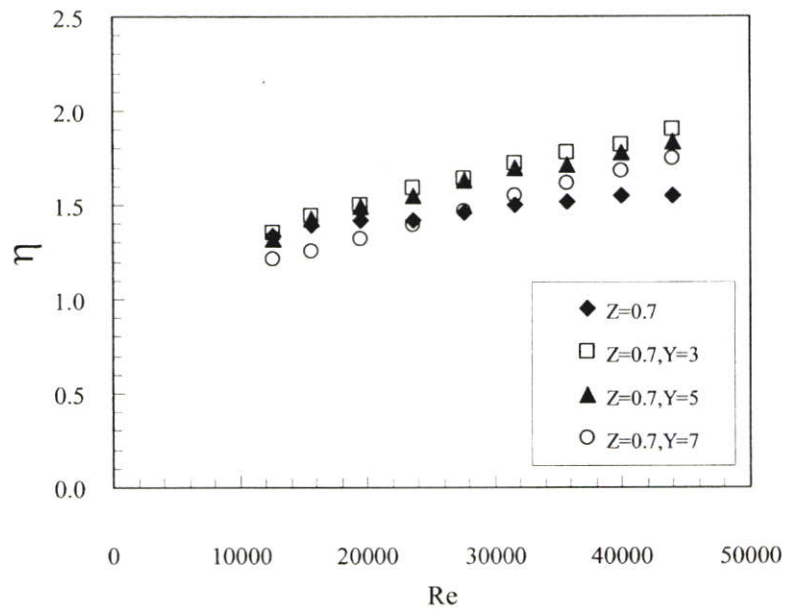
รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $Nu/Nu_0$  กรณีท่อรอยปุ่ม  $Z = 0.7$  ร่วมกับการใส่ไบบิด



รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $f$  กรณีท่อรอยปุ่ม  $Z = 0.7$  ร่วมกับการใส่ไบบิด



รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f/f_0$  กรณีท่อร้อยนํ้า  $Z = 0.7$  ร่วมกับการใส่ไบบิต



รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $\eta$  กรณีท่อร้อยนํ้า  $Z = 0.7$  ร่วมกับการใส่ไบบิต

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ท่อทดสอบที่มีรอยนํ้าจำนวน 4 แถว วางรอยนํ้าในแนวสลับมีค่าอัตราระยะรอยนํ้า  $Z$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่าอัตราการบิด  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ส์สูงขึ้น ตามการปรับเพิ่มอัตรา

การไหล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น การไหลปั่นป่วนมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะเพิ่มสูงขึ้น และจากผลการทดลองจะพบว่าท่อทดสอบที่มีรอยบวมแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิตจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงกว่าในกรณีท่อรอยบวมแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 ที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต เนื่องจากเมื่อตัวกลางน้ำร้อนไหลในท่อชั้นใน กระบอบผิวไบบิตที่มีลักษณะเกลียวอย่างต่อเนื่องตลอดแนวความยาวส่วนทดสอบ 1.5 เมตร จะทำให้เกิดการไหลหมุนวนเพิ่มความปั่นป่วน และหน่วงเวลาการไหลในชุดทดสอบให้มากขึ้น และจากการไหลหมุนวน เป็นผลให้ของไหลเกิดการไหลกระแทกผนังท่อได้ดีขึ้น เมื่อผนวกกับผิวท่อที่มีลักษณะพื้นผิวขรุขระจากการสร้างรอยบวม จะยิ่งช่วยเพิ่มความปั่นป่วนให้กับการไหลได้มากขึ้น ทำให้เพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า ในกรณีท่อรอยบวมที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิตร่วมด้วย จากผลการทดลอง พบว่ากรณีท่อทดสอบที่มีรอยบวมแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่าอัตราการบิด  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่าตัวเลขนัสเซิลท์สูงที่สุด สำหรับในด้านความเสียดทาน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ จะมีค่าสูง และเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานก็มีค่าลดลง และพบว่าท่อทดสอบที่มีรอยบวมแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงที่สุด โดยสูงกว่าท่อรอยบวมที่ร่วมกับการใส่ไบบิตที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 5, 7 และในกรณีท่อรอยบวมที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอัตราส่วนการบิดตัวที่มากกว่า จะรบกวนด้านทานการไหลให้ของไหลผ่านได้ลำบากมากยิ่งขึ้น

สำหรับประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเมื่อคิดที่การสูญเสียกำลังการไหลเท่ากัน ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่า 25000 มีเพียงกรณีท่อรอยบวมแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต  $Y$  เท่ากับ 7 เท่านั้น ที่มีค่าประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่ากรณีท่อรอยบวมที่ไม่ได้ใส่ไบบิต และในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำสูงกว่า 25000 ท่อทดสอบที่มีรอยบวมแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิตทุกช่วง จะมีค่าประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีท่อรอยบวมที่ไม่ได้ใส่ไบบิตทุกกรณี

### 5.5.2 กรณีท่อที่มีรอยบวมแนวสลับ $Z$ เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต $Y$ เท่ากับ 3, 5, 7

จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกรณีท่อที่มีการสร้างรอยบวมที่ชัดเจนในแนวสลับ ที่อัตราระยะรอยบวม  $Z$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5, 7 ตามลำดับ ซึ่งอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

รูปที่ 5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $Re$  สำหรับท่อที่มีรอยบวมแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 และร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ พิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า  $Nu$  เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยในกรณีท่อที่มีรอยบวมแนว

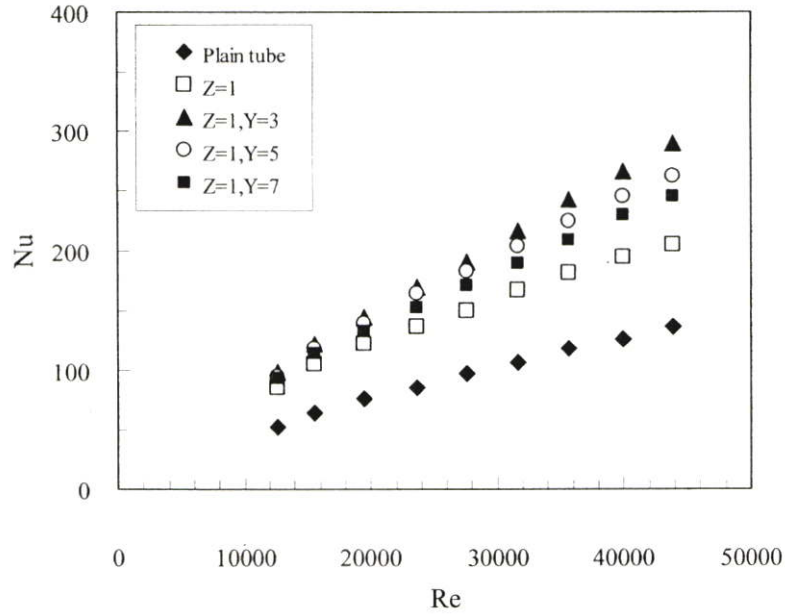
สลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่า  $Nu$  เพิ่มขึ้นสูงที่สุด โดยมีค่าสูงกว่าในกรณีร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 5, 7 และในกรณีท่ที่มีรอยนุ้มนแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 ที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต ตามลำดับ

รูปที่ 5.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับอัตราส่วนระหว่าง  $Nu$  ในกรณีท่ทดสอบที่มีรอยนุ้มนแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ กับค่า  $Nu_0$  ในกรณีท่เปล่า ( $Nu/Nu_0$ ) เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่าในกรณีท่ทดสอบท่มีรอยนุ้มนแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 และในกรณีท่ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $Nu$  เฉลี่ยสูงกว่าในกรณีท่เปล่าผิวเรียบ ประมาณ 1.56 เท่า, 2.02 เท่า, 1.90 เท่า และ 1.79 เท่า ตามลำดับ

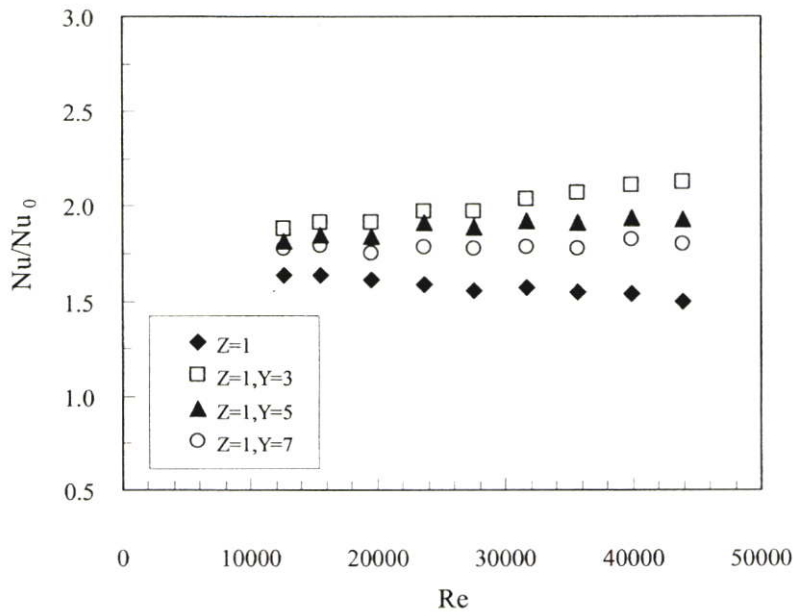
รูปที่ 5.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $f$  สำหรับท่ทดสอบท่ที่มีรอยนุ้มนแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นว่า เมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นค่า  $f$  จะค่อย ๆ ลดลง และกรณีท่ทดสอบท่ที่มีรอยนุ้มนแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $f$  มากกว่ากรณีท่เปล่า โดยในกรณีร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่า  $f$  สูงสุด

รูปที่ 5.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับอัตราส่วน  $f$  ระหว่างท่ทดสอบท่ที่มีรอยนุ้มนแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ กับ  $f_0$  ในกรณีท่เปล่า ( $f/f_0$ ) จากการพิจารณาผลการทดลองจะเห็นว่า ท่ทดสอบท่ที่มีรอยนุ้มนสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 และในกรณีท่ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 จะมีค่า  $f$  โดยเฉลี่ยสูงกว่าท่เปล่า ประมาณ 2.21 เท่า, 4.64 เท่า, 4.39 เท่า และ 3.92 เท่าตามลำดับ

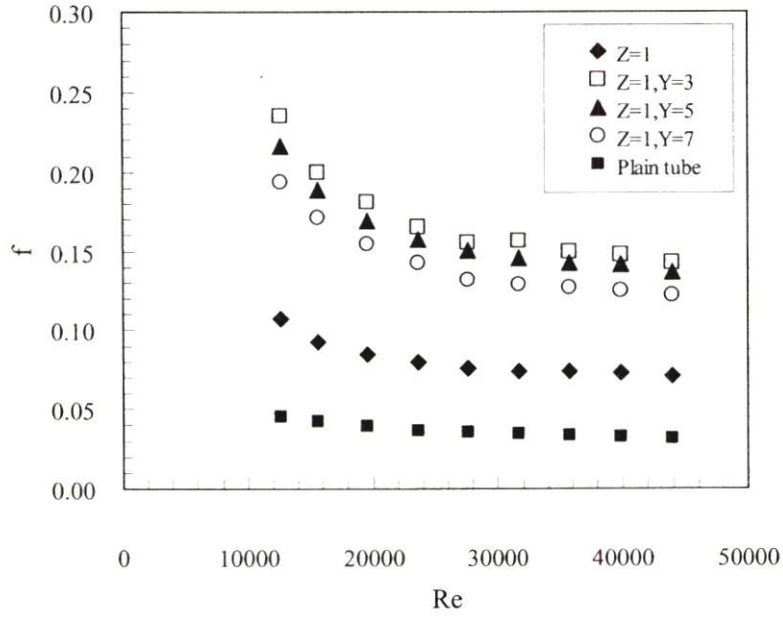
รูปที่ 5.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $\eta$  ประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนพิจารณาที่การสูญเสียกำลังการไหลเท่ากัน ของท่ทดสอบท่ที่มีรอยนุ้มนแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 และในกรณีท่ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ เมื่อพิจารณากราฟแสดงผล จะเห็นว่า มีค่า  $\eta$  โดยเฉลี่ยประมาณ 1.21, 1.20, 1.16 และ 1.13 ตามลำดับ



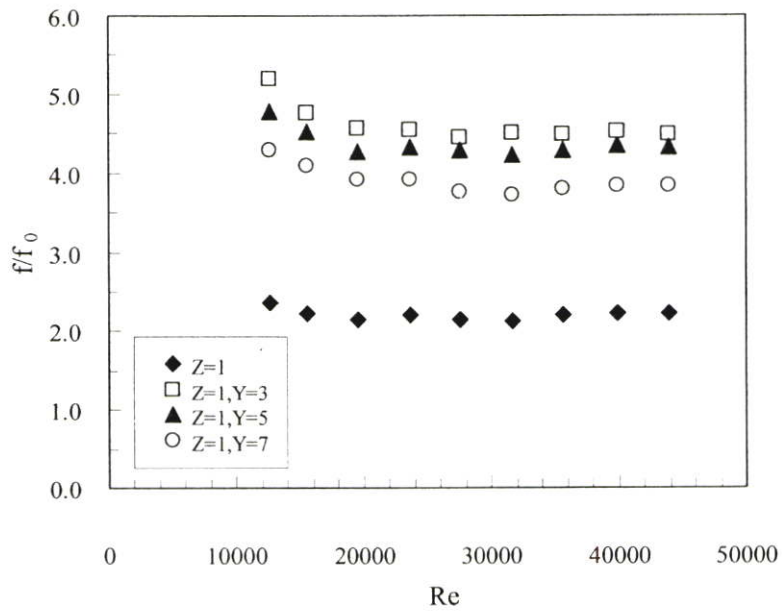
รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu กรณีท่อร้อยนุ่น  $Z = 1.0$  ร่วมกับการใส่ใบบิด



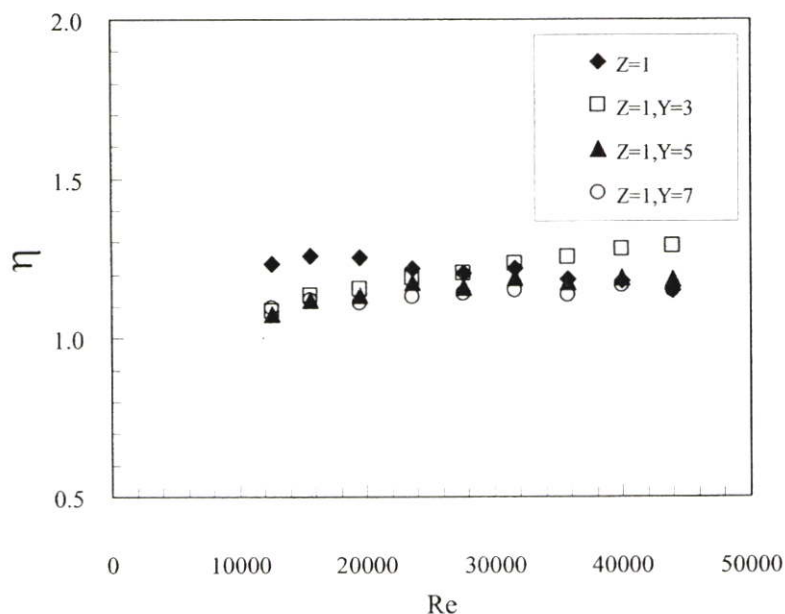
รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $Nu/Nu_0$  กรณีท่อร้อยนุ่น  $Z = 1.0$  ร่วมกับการใส่ใบบิด



รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f$  กรณีท่อรอยนูน  $Z = 1.0$  ร่วมกับการใส่ไบบิต



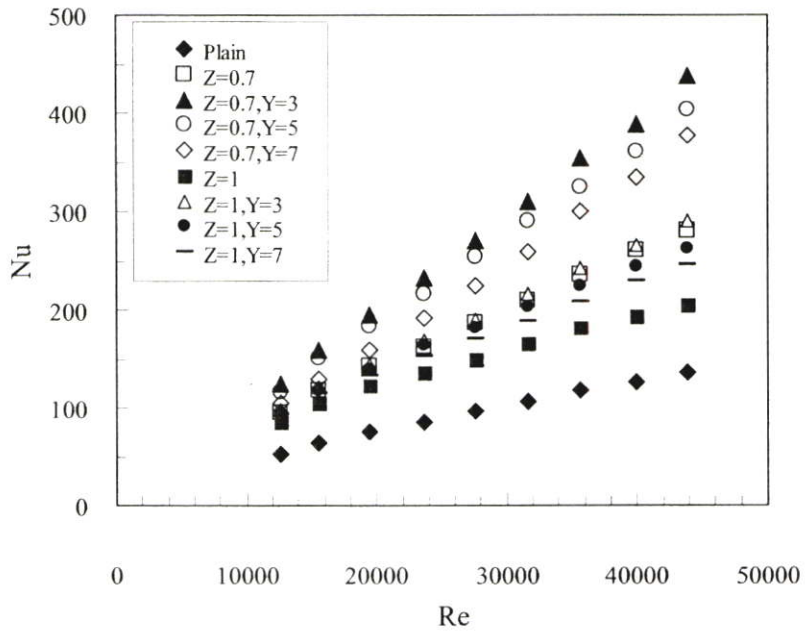
รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f/f_0$  กรณีท่อรอยนูน  $Z = 1.0$  ร่วมกับการใส่ไบบิต



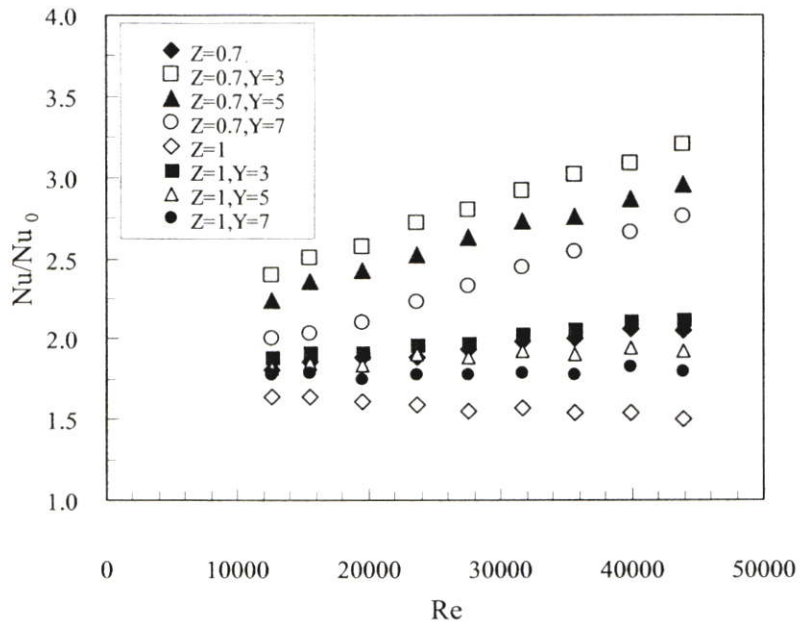
รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $\eta$  กรณีท่อร้อยนํ้า  $Z = 1.0$  ร่วมกับการใส่ไบบิต

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ท่อทดสอบที่มีร้อยนํ้าจำนวน 4 แถว วางร้อยนํ้าในแนวสลับมีค่าอัตราระยะร้อยนํ้า  $Z$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่าอัตราการบิด  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น และจากผลการทดลองจะพบว่าท่อทดสอบที่มีร้อยนํ้าแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงกว่าในกรณีท่อร้อยนํ้าแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 ที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต เนื่องจากเมื่อตัวกลางน้ำร้อนที่ไหลในท่อชั้นใน ไหลกระทบผิวไบบิตที่มีลักษณะเกลียวอย่างต่อเนื่อง จะทำให้เกิดการไหลหมุนวน และหน่วงเวลาการไหลผ่านชุดทดสอบให้นานขึ้น และจากการไหลหมุนวนเป็นผลให้ของไหลเกิดการไหลกระทบผิวนิ่งท่อได้ดีขึ้น เมื่อร่วมกับผิวท่อที่มีร้อยนํ้า จะยิ่งช่วยเพิ่มความปั่นป่วนให้กับการไหลได้มากขึ้น ทำให้เพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า ในกรณีท่อร้อยนํ้าที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิตร่วมด้วย และจากผลการทดลอง พบว่ากรณีท่อทดสอบที่มีร้อยนํ้าแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่าอัตราการบิด  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่าตัวเลขนัสเซลท์สูงสุด สำหรับในด้านความเสียดทาน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ จะมีค่าสูง และเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานก็มีค่าลดลง และพบว่าท่อทดสอบที่มีร้อยนํ้าแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต  $Y$  เท่ากับ 3 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สุด โดยสูงกว่าท่อร้อยนํ้าที่ร่วมกับการใส่ไบบิตที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 5, 7 และในกรณีท่อร้อยนํ้าที่ไม่ได้ทำการใส่ไบบิต ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอัตราส่วนการบิดตัวที่มากกว่า จะรบกวนด้านทานการไหลให้ของไหลผ่านได้ลำบากมากยิ่งขึ้น

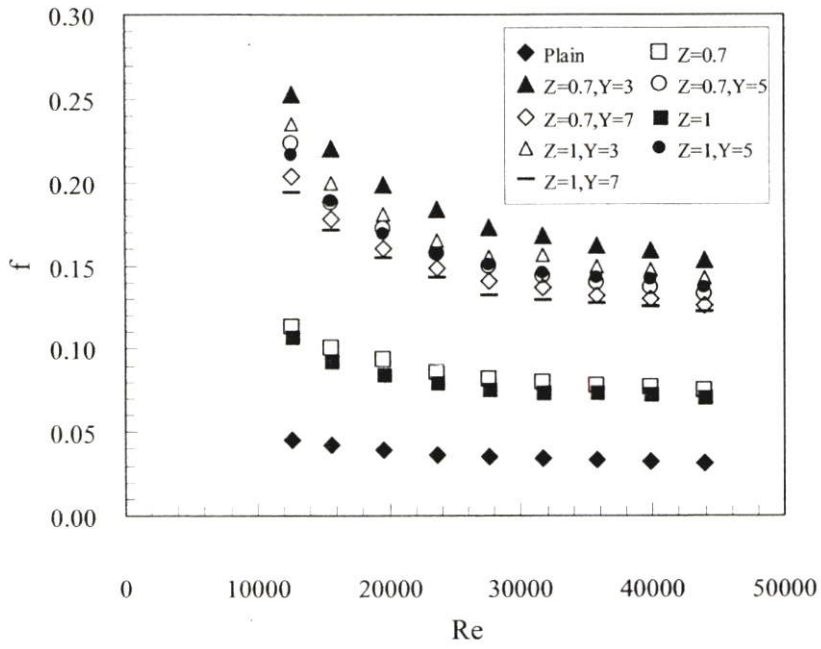
### 5.5.3 สรุปความสัมพันธ์กรณีท่อที่มีรอยบุ๋มแนวสลับร่วมกับการใส่ใบบิด Y เท่ากับ 3, 5, 7



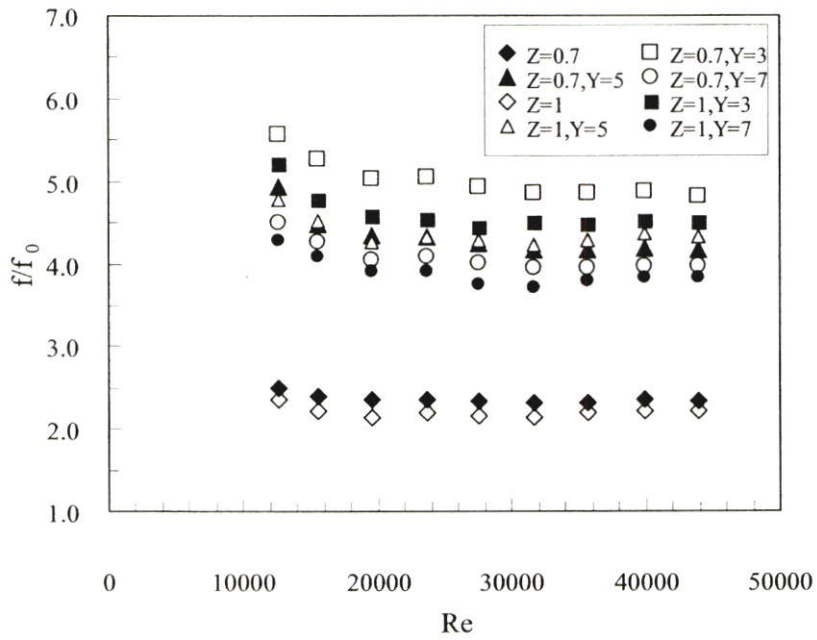
รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu กรณีท่อรอยบุ๋มแนวสลับร่วมกับการใส่ใบบิด



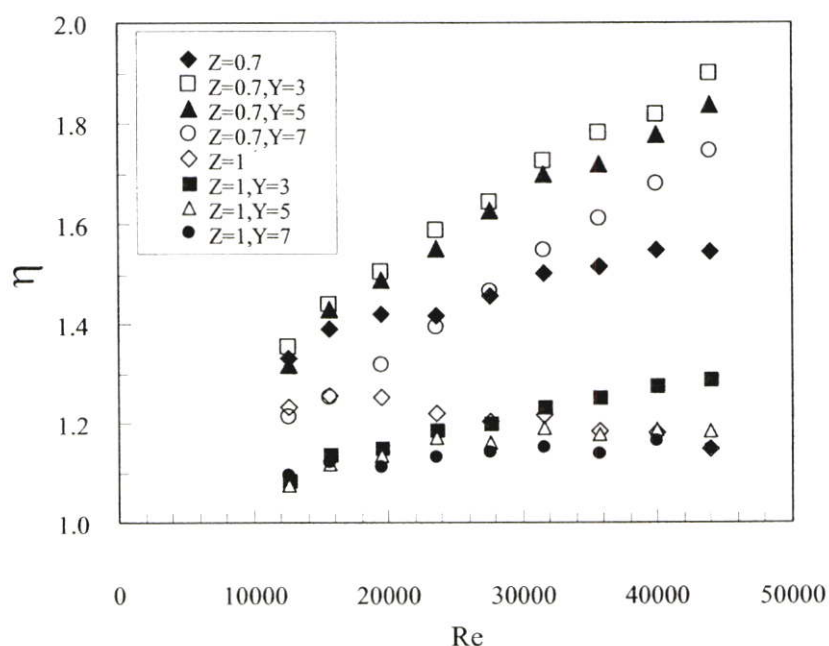
รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $Nu/Nu_0$  กรณีท่อรอยบุ๋มแนวสลับร่วมกับการใส่ใบบิด



รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f$  กรณีที่ท่อขรุขระแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต



รูปที่ 5.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Re$  กับ  $f/f_0$  กรณีที่ท่อขรุขระแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต



รูปที่ 5.42 ความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ  $\eta$  กรณีท่อร้อยนํ้าแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต

สรุปผลความสัมพันธ์จากการทดลอง กรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต ทั้งหมดทุกกรณีที่ทำการศึกษา แสดงในรูปที่ 5.38 – 5.42 พบว่ากรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 3 จะมีค่า Nu เพิ่มขึ้นสูงสุด มากกว่ากรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิตทั้งหมดที่ทำการศึกษา โดยมีค่า Nu เพิ่มขึ้นสูงสุด 219 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่า และมีค่า Nu โดยเฉลี่ยสูงกว่าในกรณีท่อเปล่าผิวเรียบ ประมาณ 2.88 เท่า และในกรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 1 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 7 จะมีค่า Nu เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด โดยมีค่า Nu โดยเฉลี่ยสูงกว่าในกรณีท่อเปล่าผิวเรียบ ประมาณ 1.79 เท่า สำหรับผลกระทบการเพิ่มขึ้นของความเสียดทาน กรณีท่อทดสอบที่มีรอยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 3 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน สูงกว่าทุกกรณี โดยมีค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเปรียบเทียบกับกรณีท่อเปล่า ( $f/f_0$ ) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 5.05 เท่า และกรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 1 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 7 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยกว่ากรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิตอื่น ๆ

ประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน  $\eta$  พิจารณาที่การสูญเสียกำลังการไหล เท่ากัน พบว่าท่อทดสอบที่มีรอยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า Y เท่ากับ 3

มีค่า  $\eta$  โดยเฉลี่ยสูงกว่าทุกกรณีโดยมีค่าเท่ากับ 1.64 และกรณีท่อที่มีรอยนูนแนวสลับ Z เท่ากับ 1 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่ค่า  $Y$  เท่ากับ 7 มีค่า  $\eta$  โดยเฉลี่ยน้อยกว่าทุกกรณีโดยมีค่าเท่ากับ 1.13

## 5.6 สหพันธ์ระหว่าง $Nu$ และ $f$ กับ ระยะเวลาของรอยนูน ( $S$ และ $Z$ ) และอัตราการบิดตัวไบบิต ( $Y$ )

### 5.6.1 กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิต

การหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $Re$ ,  $S$  และ  $Y$  จากข้อมูลการทดลองเพื่อหาค่า  $Nu$  สำหรับการไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 45,000 สำหรับท่อทดสอบที่มีรอยนูนแนวตรง ค่า อัตราระยะเวลาของรอยนูน  $S$  เท่ากับ 0.7 และ 1.0 ร่วมกับใส่ไบบิต ที่มีค่าอัตราการบิดตัว  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลที่  $S$  และ  $Y$  ต่าง ๆ มาวิเคราะห์สร้างสหสัมพันธ์ระหว่างค่า  $Nu$  กับ  $S$  และ  $Y$  โดยใช้หลักการลอการิทึมและความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังนี้  
ขั้นแรกสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu/Pr^{0.3}$  กับ  $Re$  จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้คือ

$$Nu = C_0 Re^{0.7927} Pr^{0.3}$$

โดยค่า  $C_0$  คือค่าคงที่ จากนั้นพิจารณาค่า  $S$  ที่มีผลต่อค่า  $Nu$  โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu/(Pr^{0.3} Re^{0.7927})$  กับ  $(1+S)$  จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้คือ

$$Nu = C_1 Re^{0.7927} Pr^{0.3} (1+S)^{-1.202}$$

โดยค่า  $C_1$  คือค่าคงที่ จากนั้นพิจารณาค่า  $Y$  ที่มีผลต่อค่า  $Nu$  โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu/(Pr^{0.3} Re^{0.7927} (1+S)^{-1.202})$  กับ  $Y$  ซึ่งจะสามารถหาสมการสหสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $S$  และ  $Y$  กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรง  $S$  ร่วมกับการใส่ไบบิต ดังนี้คือ

$$Nu = 0.1132 Re^{0.7927} Pr^{0.3} (1+S)^{-1.202} Y^{-0.199}$$

การหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  กับ  $Re$ ,  $S$  และ  $Y$  จากข้อมูลการทดลองเพื่อหาค่า  $f$  สำหรับการไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 45,000 สำหรับท่อทดสอบที่มีรอยนูนแนวตรง ค่าอัตราระยะเวลาของรอยนูน  $S$  เท่ากับ 0.7 และ 1.0 ร่วมกับใส่ไบบิต ที่มีค่าอัตราการบิดตัว  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลที่  $S$  และ  $Y$  ต่าง ๆ มาวิเคราะห์สร้างสหสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f$  กับ  $S$  และ  $Y$  สามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  กับ  $Re$  จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้คือ

$$f = C_0 Re^{-0.3846}$$

โดยค่า  $C_0$  คือค่าคงที่ จากนั้นพิจารณาค่า  $S$  ที่มีผลต่อค่า  $f$  โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/(Re^{-0.3846})$  กับ  $(1+S)$  จะสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้คือ

$$f = C_1 Re^{-0.3846} (1+S)^{-0.9085}$$

โดยค่า  $C_1$  คือค่าคงที่ จากนั้นพิจารณาค่า  $Y$  ที่มีผลต่อค่า  $f$  โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/(Re^{-0.3846} (1+S)^{-0.9085})$  กับ  $Y$  ซึ่งจะสามารถหาสมการสหสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  กับ  $S$  และ  $Y$  กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรง  $S$  ร่วมกับการใส่ไบบิต ดังนี้คือ

$$f = 17.4005 Re^{-0.3846} (1+S)^{-0.9085} Y^{-0.2091}$$

### 5.6.2 กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต

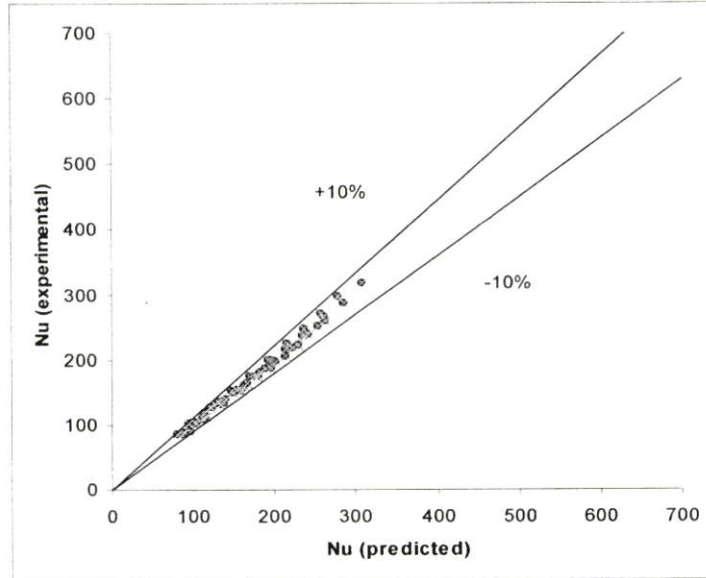
การหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu$  กับ  $Re$ ,  $Z$  และ  $Y$  จากข้อมูลการทดลองเพื่อหาค่า  $Nu$  และ  $f$  สำหรับการไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 45,000 สำหรับท่อทดสอบที่มีรอยนูนแนวสลับ ค่า อัตราระยะรอยนูน  $Z$  เท่ากับ 0.7 และ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต ที่มีค่าอัตราการบิดตัว  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลที่  $Z$  และ  $Y$  ต่าง ๆ มาวิเคราะห์สร้างสหสัมพันธ์ระหว่างค่า  $Nu$  กับ  $Z$  และ  $Y$  โดยใช้หลักการลอการิทึมและความสัมพันธ์เชิงเส้น และขั้นตอนเหมือนกับในหัวข้อ 5.8.1 จะได้สมการสหพันธ์ของค่า  $Nu$  และ สมการสหพันธ์ของค่า  $f$  กับ  $Z$  และ  $Y$  ตามลำดับดังนี้

$$Nu = 0.0807 Re^{0.8837} Pr^{0.3} (1+Z)^{-1.946} Y^{-0.1623}$$

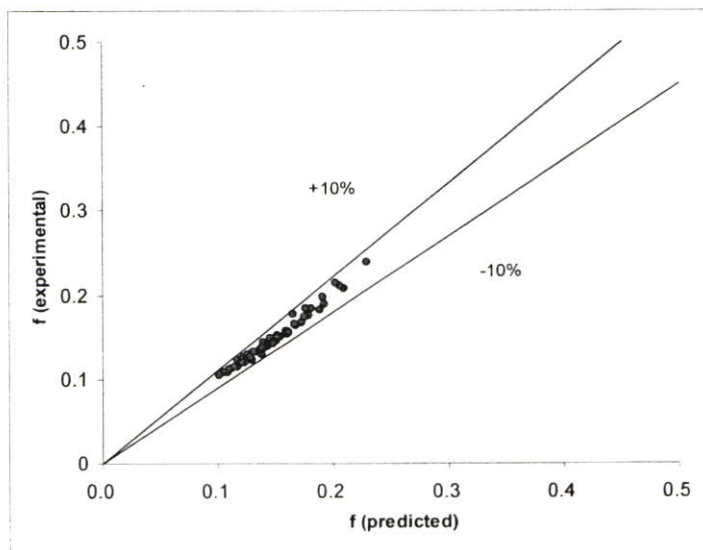
$$f = 10.0212 Re^{-0.3612} (1+Z)^{-0.2187} Y^{-0.2217}$$

### 5.6.3 ความคลาดเคลื่อนจากสมการสหพันธ์

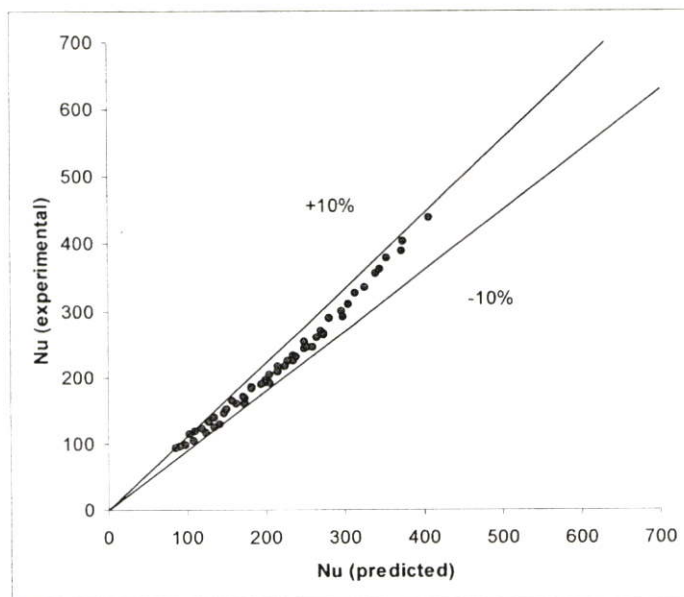
เมื่อทดลองนำค่า  $Re$ ,  $S$ ,  $Z$  และ  $Y$  มาแทนค่าในสมการสหพันธ์เพื่อหา  $Nu_{predict}$  และ  $f_{predict}$  แล้วนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับ  $Nu$  และ  $f$  จากการทดลองเพื่อหาความคลาดเคลื่อนในกรณีท่อที่มีรอยขุ่นแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิต และกรณีท่อที่มีรอยขุ่นแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิตดังที่แสดงในรูปที่ 5.43 – 5.44 และ 5.45 – 5.46 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์



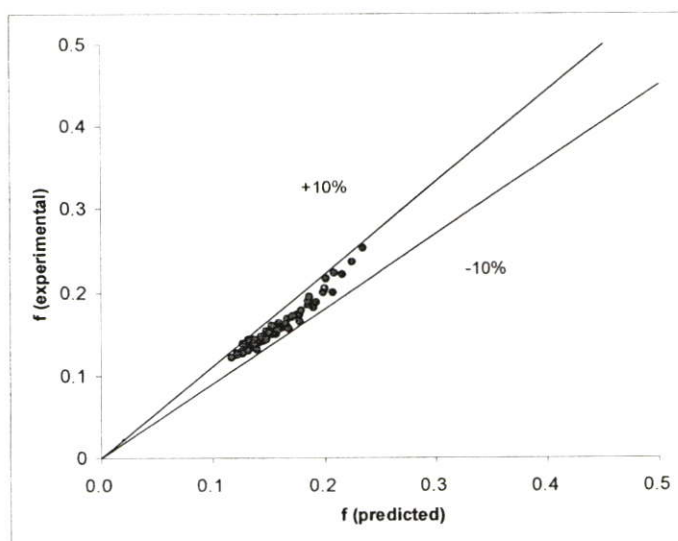
รูปที่ 5.43 แสดงความคลาดเคลื่อนสหพันธ์  $Nu$  กรณีท่อที่มีรอยขุ่นแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิต



รูปที่ 5.44 แสดงความคลาดเคลื่อนสหพันธ์  $f$  กรณีท่อที่มีรอยขุ่นแนวตรงร่วมกับการใส่ไบบิต



รูปที่ 5.45 แสดงความคลาดเคลื่อนสหพันธ์ Nu กรณีท่อที่มีรอยขุ่นแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต



รูปที่ 5.46 แสดงความคลาดเคลื่อนสหพันธ์ f กรณีท่อที่มีรอยขุ่นแนวสลับร่วมกับการใส่ไบบิต

## บทที่ 6

# สรุปและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

ผลที่ได้จากการศึกษา การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกันโดยใช้ท่อที่มีรอยนูนร่วมกับการใส่ไบบิต พบว่ากรณีท่อที่มีรอยนูน มีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน  $\eta$  โดยเฉลี่ยมากกว่า 1 ทุกกรณี โดยท่อที่มีรอยนูนแนวสลับจะมีค่า  $\eta$  สูงกว่าท่อที่มีรอยนูนแนวตรงในกรณีระยะห่างรอยนูนเท่ากัน สำหรับกรณีท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบิต ให้ค่า  $\eta$  ใกล้เคียง 1 มีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 0.86 – 0.89 และกรณีท่อที่มีรอยนูนร่วมกับการใส่ไบบิต มีค่า  $\eta$  โดยเฉลี่ยมากกว่า 1 ทุกกรณีที่ทำการทดลอง โดยมีบางกรณีที่มีค่า  $\eta$  น้อยกว่ากรณีท่อทดสอบที่มีรอยนูนที่ไม่มีการใส่ไบบิต โดยสรุปผลการศึกษาในแต่ละกรณีได้ดังนี้

1. กรณีท่อที่มีรอยนูน การวางรอยนูนแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 0.7 ให้ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุด เฉลี่ยประมาณ 146 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่า ส่วนรอยนูนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 และรอยนูนแนวสลับ  $Z$  เท่ากับ 1.0 จะให้ประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน คือเฉลี่ยประมาณ 127 เปอร์เซ็นต์ และ 121 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และรอยนูนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 จะให้ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด คือเฉลี่ยประมาณ 110 เปอร์เซ็นต์

2. กรณีท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบิต ที่มีค่าอัตราการบิด  $Y$  เท่ากับ 3, 5 และ 7 พบว่า จะมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน โดยกรณีท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบิต ที่มีค่าอัตราการบิด  $Y$  เท่ากับ 5 จะมีประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด คือเฉลี่ยประมาณ 89 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกรณีท่อเปล่าร่วมกับการใส่ไบบิต ที่มีค่าอัตราการบิด  $Y$  เท่ากับ 3 และ 7 มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย 86 และ 87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3. กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต  $Y$  เท่ากับ 3, 5, 7 กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต  $Y$  เท่ากับ 3 และ 5 จะให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงกว่ากรณีท่อรอยนูนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ที่ไม่ได้ใส่ไบบิต คือมีค่าประมาณ 130 และ 128 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีเพียงกรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต  $Y$  เท่ากับ 7 เท่านั้นที่มีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยต่ำกว่ากรณีที่ไม่ได้ใส่ไบบิต โดย มีค่าประมาณ 115 เปอร์เซ็นต์

4. กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต  $Y$  เท่ากับ 3, 5, 7 เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ พบว่า กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรง  $S$  เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต จะให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ใกล้เคียงกับ กรณีท่อที่มีรอยนูนแนวตรง  $S$

เท่ากับ 1.0 ที่ไม่ได้ใส่ไบบิตร่วมด้วย มีเพียงกรณีท่อร้อยนํ้าร่วมกับการใส่ไบบิต Y เท่ากับ 3 เท่านั้นที่มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย สูงกว่ากรณีท่อร้อยนํ้าที่ไม่ได้ใส่ไบบิต โดยกรณีท่อร้อยนํ้าร่วมกับการใส่ไบบิต Y เท่ากับ 3, 5, และ 7 มีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย ประมาณ 112, 107 และ 103 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5. กรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต Y เท่ากับ 3, 5, 7 กรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิตทุกช่วงอัตราบิด จะให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงกว่ากรณีท่อร้อยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ที่ไม่ได้ใส่ไบบิต โดยกรณีท่อร้อยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ใส่ไบบิต Y เท่ากับ 3 มีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด รองลงมาคือกรณีท่อร้อยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต Y เท่ากับ 5 และ 7 ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยประมาณ 164, 160 และ 147 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

6. กรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต Y เท่ากับ 3, 5, 7 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ พบว่ากรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 1.0 ร่วมกับการใส่ไบบิต จะให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ใกล้เคียงกับ กรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 1.0 ที่ไม่ได้ใส่ไบบิตร่วมด้วย โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยประมาณ 120, 116 และ 113 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

7. จากผลการศึกษา เมื่อเปรียบเทียบการทดลองทุกกรณีข้างต้น พบว่ากรณีท่อที่มีรอยนํ้าแนวสลับ Z เท่ากับ 0.7 ร่วมกับการใส่ไบบิต Y เท่ากับ 3 ซึ่งเป็นกรณีที่ระยะห่างรอยนํ้าน้อยที่สุด และเป็นการวางแนวรอยนํ้าแบบสลับร่วมกับไบบิตที่มีอัตราการบิดตัวมากที่สุด ให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด โดยมีค่าสูงสุด 190 เปอร์เซ็นต์ ที่ช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 44000 และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 164 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่า

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แสดงผลได้ว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน โดยใช้เทคนิคท่อที่มีรอยนํ้าร่วมกับการใส่ไบบิต ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้นและเพิ่มความสามารถการแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อต้องคำนึงถึงผลจากความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งนอกจากนี้ ยังมีเทคนิคอื่น ๆ ในการปรับปรุงสมรรถนะแลกเปลี่ยนความร้อนที่น่าสนใจ ไม่ว่าจะเป็น การใส่ขดลวดหรือขดสปริงร่วมกับการใส่ไบบิต, การเจาะร่องเกลียวร่วมกับการใส่ไบบิต, การสร้างผิวคลื่นร่วมกับการใส่ไบบิต เป็นต้น อย่างไรก็ตามการศึกษานี้คำนึงถึงผลของประสิทธิภาพทางความร้อนเป็นหลัก ซึ่งในแง่อุตสาหกรรมหรือการใช้งานจริง จะต้องพิจารณาถึงเงื่อนไขการทำงานของระบบ ความเหมาะสม และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้อง

## บรรณานุกรม

- [1] รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์, “ การถ่ายเทความร้อน ”, มิถุนายน พ.ศ. 2542
- [2] นิติเวช ทองนุช, วิทยานิพนธ์, “ การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน โดยใช้แผ่นบิดแบ่งเป็นช่วงในท่อ”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2548
- [3] วิชาญ คงเกียรติไพฑูรย์ วราคม เน็ดน้อย, ปรัชญา ส้ารวยศิลป์, สมศักดิ์ เพ็ชรกุล และ สมิต์ เอี่ยมสะอาด, การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยการสอดใส่แผ่นบิด, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2, กรกฎาคม 2549
- [4] Holman, J.P., "Heat Transfer", McGraw-Hill, New York, 1989
- [5] Nag, P.K., "Heat Transfer", Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2002
- [6] P. Promvong, S. Eiamsa-ard, Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted-tape insert, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.34, pp.849-859, 2007.
- [7] C. Yildiz, Y. Bicer, D. Pehlivan, Applied Energy 54(1), 49(1996)
- [8] E. K. Akpinar, Y. Bicer, International Journal of Thermal Sciences 44 598–607(2005)
- [9] J. Chen, H. Muller-Steinhagen, Geoffrey G. Dufy, Heat transfer enhancement in dimpled tubes, Applied Thermal Engineering 21 535-547 (2001)
- [10] G.F. Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, "Process Heat Transfer", CRC Press, Florida, 1994
- [11] S.K. Agarwal and M.Raj Rao, Heat transfer augmentation for the flow of a viscous liquid in circular tubes using twisted tape inserts, Heat Mass Transfer, Vol.39, No.17, pp.3547-3557, 1996.
- [12] S.K.Saha, A.Dutta, S.K.Dhal, Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.44, pp.4211-4223, 2001.
- [13] S.Ray, A.W.Date, Friction and heat transfer characteristics of flow through square duct with twisted tape insert, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.46, pp.889-902, 2003.
- [14] E. Kavak Akpinar, Y. Bicer, C. Yildiz, and D. Pehlivan, Heat transfer enhancement in a concentric double pipe exchanger equipped with swirl elements, Int.Comm Heat Mass Transfer, Vol.31, No.6, pp 857-868, 2004

- [15] P. Promvong, S. Eiamsa-ard, and S. Sripattanapipat, Numerical Simulation of Turbulent Flow in a Channel with Ribs, THE 7<sup>TH</sup> ASIAN SYMPOSIUM ON VISUALIZATION, 2003

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำอิมตัว

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำอัดตัว

Temperature, $T$ (K)	Specific			Heat of			Specific			Thermal			Expansion	
	Volume ( $m^3 / kg$ )	vapor isation $h_{fg}$ KJ / kg	Pressure $P$ (bars) <sup>b</sup>	heat (KJ / kg K)	Viscosity (Ns / m <sup>2</sup> )	conductivity (W / m K)	randtl umber	Surface tension $\sigma_f 10^3$ (N/M)	coefficient $\beta_f 10^6$ (K <sup>-1</sup> )	Temperature $T$ (K)				
273.15	1.000	2502	0.00611	4.217	1750	569	12.99	75.5	-68.05	273.15				
275	1.000	2497	0.00697	4.211	1652	574	12.22	75.3	-32.74	275				
280	1.000	2485	0.00990	4.198	1422	582	10.26	74.8	46.04	280				
285	1.000	2473	0.01387	4.189	1225	590	8.81	74.3	114.1	285				
290	1.001	2461	0.01917	4.184	1080	598	7.56	73.7	174.0	290				
295	1.002	2449	0.02617	4.181	959	606	6.62	72.7	227.5	295				
300	1.003	2438	0.03531	4.179	855	613	5.83	71.7	276.1	300				
305	1.005	2426	0.04712	4.178	769	620	5.20	70.9	320.6	305				
310	1.007	2414	0.06221	4.178	695	628	4.62	70.0	361.9	310				
315	1.009	2402	0.08132	4.179	631	634	4.16	69.2	400.4	315				
320	1.011	2390	0.1053	4.180	577	640	3.77	68.3	436.7	320				
325	1.013	2378	0.1351	4.182	528	645	3.42	67.5	471.2	325				
330	1.016	2366	0.1719	4.184	489	650	3.15	66.6	504.0	330				
335	1.018	2354	0.2167	4.186	453	656	2.88	65.8	535.5	335				
340	1.021	2342	0.2713	4.188	420	660	2.66	64.9	566.0	340				
345	1.024	2329	0.3372	4.191	389	668	2.45	64.1	595.4	345				
350	1.027	2317	0.4163	4.195	365	668	2.29	63.2	624.2	350				
355	1.030	2304	0.5100	4.199	343	671	2.14	62.3	652.3	355				
360	1.034	2291	0.6209	4.203	324	674	2.02	61.4	697.9	360				
365	1.038	2278	0.7514	4.209	306	677	1.91	60.5	707.1	365				
370	1.041	2265	0.9040	4.214	289	679	1.80	59.5	728.7	370				
373.15	1.044	2257	1.0133	4.217	279	680	1.76	58.9	750.1	373.15				
375	1.045	2252	1.0815	4.220	274	681	1.70	58.6	761	375				
380	1.049	2239	1.2869	4.226	260	683	1.61	57.6	788	380				
385	1.053	2225	1.5233	4.232	248	685	1.53	56.6	811	385				
390	1.058	2212	1.794	4.239	237	686	1.47	55.6	841	390				

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำอิ่มตัว (ต่อ)

Temperature, $T$ (K)	Specific			Specific heat			Thermal			Expansion			
	Pressure $P$ (bars) <sup>b</sup>	Volume $v_f \cdot 10^3$	Heat of vapor isation $h_{fg}$ KJ / kg	$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	Viscosity $(Ns / m^2)$	conductivity $(W / m K)$	randit umber	Surface tension $\sigma_f \cdot 10^3$ $(N/M)$	Expansion coefficient $\beta_f \cdot 10^6$ $(K^{-1})$	Temperature $T$ (K)
400	2.455	1.067	2183	4.256	2.158	217	13.05	688	27.2	1.34	1.033	896	400
410	3.302	1.077	2153	4.278	2.221	200	13.42	688	28.2	1.24	1.054	952	410
420	4.370	1.088	2123	4.302	2.291	185	13.79	688	29.8	1.16	1.075	1010	420
430	5.699	1.099	2091	4.3331	2.369	173	14.14	685	30.4	1.09	1.10	-	430
440	7.333	1.110	2059	4.36	2.46	162	14.50	682	31.7	1.04	1.12	-	440
450	9.319	1.123	2024	4.40	2.56	152	14.85	678	33.1	0.99	1.14	-	450
460	11.71	1.137	1989	4.44	2.68	143	15.19	673	34.6	0.95	1.17	-	460
470	14.55	1.152	1951	4.48	2.79	136	15.54	667	36.3	0.92	1.20	-	470
480	17.90	1.167	1912	4.53	2.94	129	15.88	660	38.1	0.89	1.23	-	480
490	21.83	1.184	1870	4.59	3.10	124	16.23	651	40.1	0.87	1.25	-	490
500	26.40	1.203	1825	4.66	3.27	118	16.59	642	42.3	0.86	1.28	-	500
510	31.66	1.222	1779	4.74	3.47	113	16.95	631	44.7	0.85	1.31	-	510
520	37.70	1.244	1730	4.84	3.70	108	17.33	621	47.5	0.84	1.35	-	520
530	44.58	1.268	1679	4.95	3.96	104	17.72	608	50.6	0.85	1.39	-	530
540	52.38	1.294	1622	5.08	4.27	101	18.1	594	54.0	0.86	1.43	-	540
550	61.19	1.323	1564	5.24	4.64	97	18.6	580	58.3	0.87	1.47	-	550
560	71.08	1.355	1499	5.43	5.09	94	19.1	563	63.7	0.90	1.52	-	560
570	82.16	1.392	1429	5.68	5.67	91	19.7	548	76.7	0.94	1.59	-	570
580	94.51	1.433	1353	6.00	6.40	88	20.4	528	76.7	0.99	1.68	-	580
590	108.3	1.482	1274	6.41	7.35	84	21.5	513	84.1	1.05	1.84	-	590
600	123.5	1.541	1176	7.00	8.75	81	22.7	497	92.9	1.14	2.15	-	600
610	137.3	1.612	1068	7.85	11.1	77	4.1	467	103	1.30	2.60	-	610
620	159.1	1.705	941	9.35	15.4	72	25.9	444	114	1.52	3.46	-	620
630	179.7	1.856	781	12.6	22.1	67	28.0	412	130	2.0	4.8	-	630
640	202.7	2.075	560	26	42	59	32.0	367	155	4.2	9.6	-	640
645	215.2	2.351	361	90	-	54	37.0	331	178	12	26	-	645
617.4	221.2	3.170	0	x	y	45	45.0	238	238	x	y	-	647.3

ภาคผนวก ข.  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

# เทคโนโลยีเพื่อการเกษตรและ อุตสาหกรรมเกษตรที่ยั่งยืน

## Technology for Sustainable Agriculture and Agro-Industry



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

ครั้งที่ 9 ประจำปี 2551

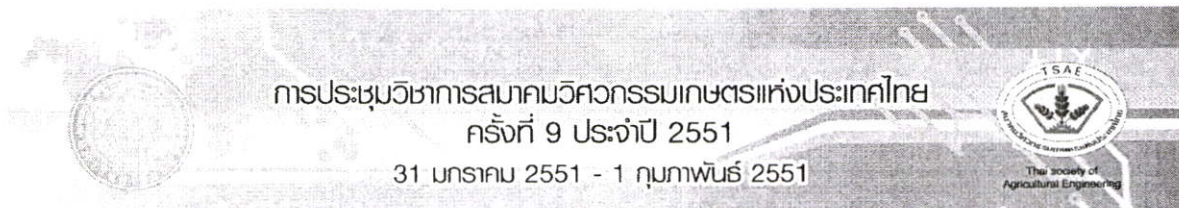
31 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ 2551

โรงแรมอิมพีเรียลเมปิง จังหวัดเชียงใหม่

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ร่วมฉลองครบรอบ 75 ปี มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ISBN : 978-974-8444-61-1



การศึกษาผลการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน  
โดยการสร้างรอยนูนที่ผิวท่อชั้นใน

Experimental investigation of heat transfer and friction loss in a concentric double pipe  
heat exchanger with dimpled inner tubes

ยุทธนา ศรีผา<sup>1</sup> และ ชินารักษ์ เขียวพงษ์<sup>2</sup>

*Yuthana Sripha<sup>1</sup> and Chinaruk Thianpong<sup>2</sup>*

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้ทำการศึกษาผลของอัตราการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนจุดศูนย์กลางร่วม ที่ทำการสร้างรอยนูนที่ผิวท่อชั้นใน ทดลองในรูปแบบการไหลสวนทางกัน ระหว่างน้ำร้อนและน้ำเย็นที่ไหลในท่อชั้นในและชั้นวงแหวนตามลำดับ กำหนดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางเข้า  $70 \pm 0.5$  °C และอุณหภูมิน้ำเย็น  $30 \pm 1$  °C ทำการทดลองโดยจัดวางตำแหน่งรอยนูนที่ระยะห่าง  $P = 1D$  ทั้งในแนวตรงและแนวสลับ กำหนดอัตราการไหลของน้ำเย็นที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 8,000 และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำร้อนในช่วงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ระหว่าง 15,000 ถึง 50,000 จากผลการศึกษาพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ท่อชั้นในเป็นแบบผิวเรียบ ขณะที่ผลกระทบจากรอยนูน ทำให้การสูญเสียจากความเสียดทานการไหลเพิ่มขึ้นเช่นกัน

**คำสำคัญ:** การถ่ายเทความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน รอยนูน

ABSTRACT

The effect of heat transfer rates and frictions loss of a counter flow double pipe heat exchanger were experimentally investigated by using dimpled inner tubes. Dimpled inner tubes, having pitch of dimples  $P = 1D$ , were used in straight and stagger arrangement. Hot and cold water were flowed through the inner tube and annulus respectively. Temperature of hot water at  $70 \pm 0.5$  °C and  $30 \pm 1$  °C of cold water were used in this study. Flow rate in the annulus was fixed at Reynolds number of 8,000 whereas flow rate in the inner tube was varied in the range of Reynolds number between 15,000 to 50,000. The experimental results showed that the heat transfer rates were increased by using dimpled inner tubes in comparison with the plain tube. However, dimple caused some increasing in flow frictions loss.

**KEYWORDS:** Heat transfer Double pipe heat exchanger Dimpled tubes

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

\* Corresponding author. Tel.: 0-2326-4197; Fax: 0-2326-4198; E-mail address : yuth\_sri@yahoo.com

## บทนำ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เป็นอุปกรณ์ใช้พลังงานที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่นใน อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเกษตร อุตสาหกรรมเคมี อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีความสำคัญในกระบวนการให้ความร้อนและการระบายความร้อนในกระบวนการผลิต และหนึ่งตัวแปรสำคัญที่จะช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิต ก็คือการเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากสถานการณ์ปัญหาด้านพลังงานของประเทศไทยในปัจจุบัน ซึ่งทำให้การปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ในอดีตจนถึงปัจจุบันผู้ผลิตพยายาม ที่จะออกแบบและปรับปรุงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถใช้ประโยชน์ได้สูงสุด เพื่อที่จะสามารถลดขนาดอุปกรณ์เพื่อลดพื้นที่การใช้งานและต้นทุนการผลิต พร้อมทั้งลดการใช้พลังงาน โดยหัวใจสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือการทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เช่นการใช้เทคนิคต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนให้การไหลซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น โดยมีวิธีการหลัก 2 วิธี ที่สำคัญ เพื่อบรรลุเป้าหมายดังกล่าว วิธีการแรกคือ active methods คือ การเพิ่มการส่งถ่ายความร้อน โดยการเพิ่มพลังงานจากแหล่งภายนอกให้ของไหล วิธีที่สองเป็นวิธีการแบบ passive methods คือ การใช้ประโยชน์จากการไหลเองโดยไม่ต้องใช้พลังงานจากแหล่งภายนอก สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อซ้อน มีวิธีการที่หลากหลาย เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนในการไหล เช่น นิติเวช ทองนุช (2548) โดยการสอดใส่ใบบิดแบบต่าง ๆ ในท่อชั้นใน สมศักดิ์ เพ็ชรกุล (2550) โดยการสอดใส่ Louvered Strips ในท่อชั้นใน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการแบบ passive methods เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนการไหลในท่อชั้นใน สำหรับบทความนี้ เทคนิควิธีการสร้างรอยขุ่นที่ผิวท่อชั้นใน จะเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลรอบ ๆ ผิวท่อชั้นใน โดยได้ทำการศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนที่ทำการสร้างรอยขุ่นที่ผิวท่อชั้นใน เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาและปรับปรุงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อไป

## ทฤษฎีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อซ้อน ในการศึกษา นี้ เพื่อหาค่าตัวเลขนัสเซลท์ ของการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำร้อนที่ไหลในท่อชั้นในและน้ำเย็นที่ไหลในท่อชั้นนวงแหวน รูปแบบการไหลสวนทางกัน ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ต่าง ๆ ใช้วิธีผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (LMTD)

$$Q = UA\Delta T_{LM} \quad (1)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยระหว่างน้ำร้อนและน้ำเย็น

$$Q = \frac{(Q_h + Q_c)}{2} \quad (2)$$

โดยการถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนที่ไหลในท่อชั้นใน

$$Q_h = (mC_p)_h \cdot (T_{h1} - T_{h2}) \quad (3)$$

ความร้อนที่น้ำเย็นในท่อชั้นนวงแหวนได้รับ

$$Q_c = (mC_p)_c \cdot (T_{c2} - T_{c1}) \quad (4)$$

สหสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนในทอมไร้มิติ

$$Nu = C Re_D^m \cdot Pr^n \quad (5)$$

ตัวเลขนัสเซลท์

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (6)$$

ตัวเลขเรย์โนลด์ 
$$Re = \frac{u D}{\nu} \quad (7)$$

กรณีทดสอบสภาพผิวขรุขระจากรอยบุ่ม วิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยหลักการ Wilson-plot method พิจารณาคุณสมบัติของไหลไม่เปลี่ยนแปลง จากสมการสหสัมพันธ์ด้านบน

$$h = CV^*{}^m \quad (8)$$

และจากค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} \quad (9)$$

กำหนดน้ำเย็นในท่อชั้นวงแหวนมีอัตราการไหลคงที่ ดังนั้น

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{C_i V_i^*{}^m} + Const = \frac{1}{h_i} + Const \quad (10)$$

ตัวเลขนัสเซิลท์ สำหรับการไหลปั่นป่วนภายในท่อผิวเรียบ โดย Dittus-Boelter

$$Nu = 0.023 Re_D^{4/5} \cdot Pr^n \quad (11)$$

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

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

การสูญเสียพลังงานจากการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน  $f$

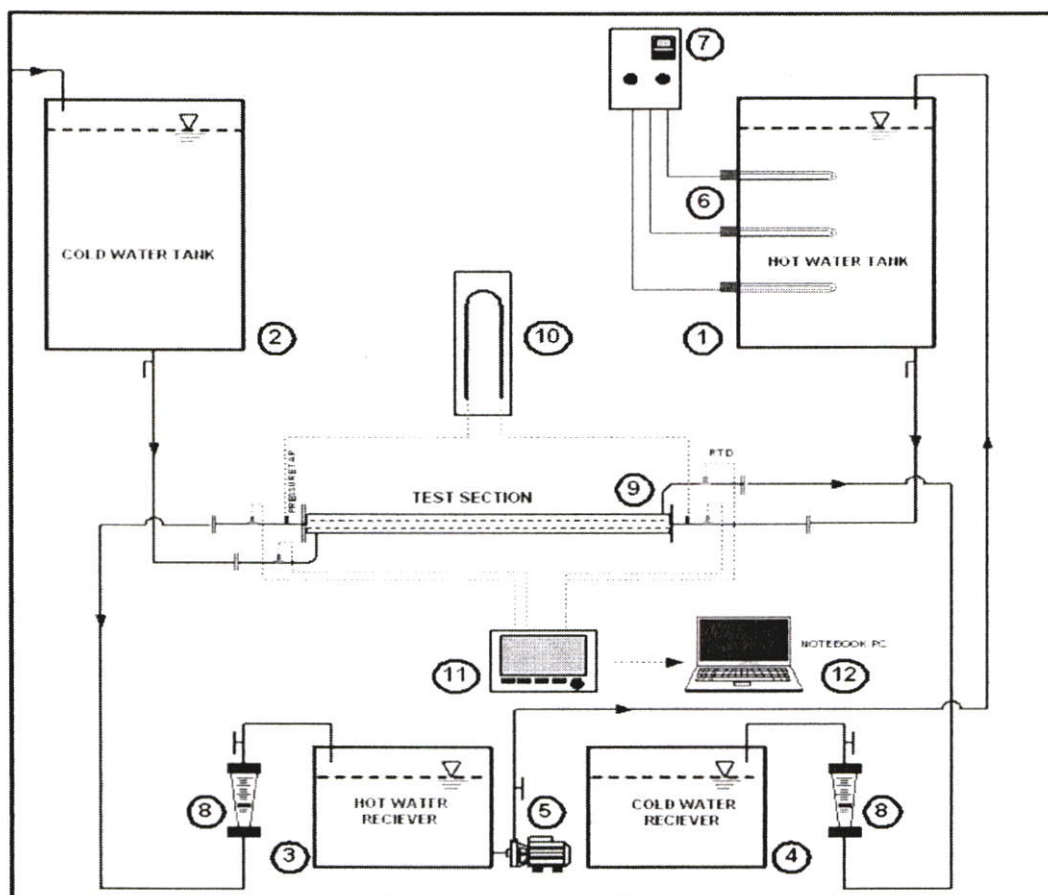
$$\frac{\Delta P}{\rho g} = f \frac{L}{D_i} \frac{u_i^2}{2g} \quad (12)$$

ประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

$$eff = \left( \frac{Nu_{dim}}{Nu_p} \right) \left( \frac{f_{dim}}{f_p} \right)^{-1/3} \quad (13)$$

### สัญลักษณ์

$Q$	อัตราการถ่ายเทความร้อน, (W)	$D$	เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ, (m)
$A$	พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน, (m <sup>2</sup> )	$Nu$	ตัวเลขนัสเซิลท์
$U$	ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวม, (W/m <sup>2</sup> K)	$Re$	ตัวเลขเรย์โนลด์
$\Delta T_{LM}$	ผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (LMTD) ,(K)	$Pr$	ตัวเลขพรันด์
$T$	อุณหภูมิ(K)	$u$	ความเร็วของไหลในท่อ, (m/s)
$C_p$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, (J/kg K)	$\nu$	ความหนืดคินเมติก (m <sup>2</sup> /s)
$m$	อัตราการไหลเชิงมวล, (kg/s)	$\Delta P$	ความดันตกคร่อม(N/m <sup>2</sup> )
$h$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไหล, (W/m <sup>2</sup> K)	$\rho$	ความหนาแน่นของไหล(kg/m <sup>3</sup> )
$k$	ค่าสภาพการนำความร้อน, (W/m K)	$f$	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
$V^*$	อัตราไหลเชิงปริมาตร(m <sup>3</sup> /s)	$g$	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง,(9.81 m/s <sup>2</sup> )
$C$	ค่าคงที่	$L$	ความยาวท่อชุดทดลอง, (m)
$h, c$	น้ำร้อน, น้ำเย็น	$eff$	ประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน
ตัวห้อย	1 ทางเข้า      2 ทางออก $i$ ด้านใน $o$ ด้านนอก $dim$ ท่อรอยบุ่ม $p$ ท่อผิวเรียบ		



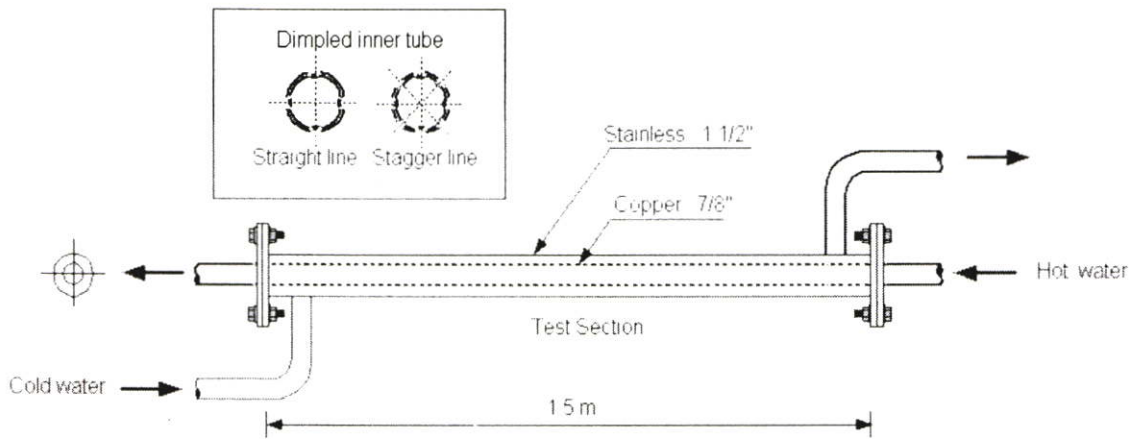
ภาพที่ 1 แผนภาพชุดทดลอง

- |                   |                             |                           |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1. ถังเก็บน้ำร้อน | 5. ปั๊มน้ำร้อน              | 9. ส่วนทดสอบ              |
| 2. ถังเก็บน้ำเย็น | 6. ฮีตเตอร์                 | 10. มานอมิเตอร์           |
| 3. ถังพักน้ำร้อน  | 7. ชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อน | 11. เครื่องบันทึกอุณหภูมิ |
| 4. ถังพักน้ำเย็น  | 8. โรตاميเตอร์              | 12. คอมพิวเตอร์           |

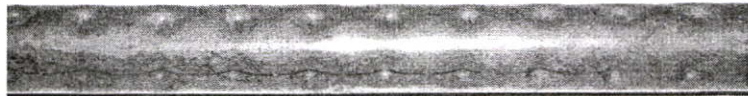
#### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนจุดศูนย์กลางร่วม ที่สร้างรอยบุ๋มที่ผิวท่อชั้นใน แสดงในภาพที่ 1 ใช้ตัวกลางในการทดลองเป็นน้ำเย็นอุณหภูมิ  $30 \pm 1$  °C และน้ำร้อนที่ให้ความร้อนโดยฮีตเตอร์ไฟฟ้า ทำการควบคุมด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิที่  $70 \pm 0.5$  °C ในถังพักเหนือส่วนทดสอบ น้ำเย็นและน้ำร้อนถูกปล่อยผ่านท่อลงสู่ส่วนทดสอบด้านล่าง โดยกำหนดรูปแบบการไหลสวนทางกัน และกำหนดให้น้ำเย็นไหลในท่อชั้นวงแหวนด้วยอัตราไหลคงที่ 1200 ลิตรต่อชั่วโมง จากการปรับวาล์วควบคุมการไหลและการอ่านค่าอัตราการไหลจากโรตاميเตอร์ ส่วนน้ำร้อนที่ไหลในท่อชั้นใน ถูกปรับค่าอัตราการไหล ตั้งแต่ 400 – 1200 ลิตรต่อชั่วโมง ภาพที่ 2 แสดงส่วนทดสอบ โดยใช้ท่อทองแดงเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 20 มิลลิเมตร เป็นท่อชั้นใน และท่อสแตนเลส เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 38 มิลลิเมตร เป็นท่อชั้นนอก ความยาวส่วนทดสอบ 1.5 เมตร ทำการหุ้มฉนวนชุดทดสอบและระบบท่อเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอก อุณหภูมิน้ำเย็นและน้ำร้อนที่ทางเข้า-ออก ส่วนทดสอบถูกวัดค่าโดย RTD pt100 และเก็บข้อมูลโดยเครื่องบันทึก Supcon R3000/4000 series Recorder ทำการบันทึกค่า CR3-22 การศึกษาผลการถ่ายเทความร้อนและความเสียหายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนโดยการสร้าง. 4 doc

ระดับความสูงแตกต่างของน้ำในมานอมิเตอร์หลอดแก้วด้วย เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าการสูญเสียเนื่องมาจากความเสียดทานภายในท่อ เริ่มทำการทดลองโดยใช้ท่อชั้นในแบบท่อผิวเรียบเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นทำการทดลองโดยเปลี่ยนท่อชั้นในให้เป็นท่อรอยบุ๋ม โดยความลึกและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยบุ๋มคือ 3 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างรอยบุ๋ม เท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางท่อชั้นใน (ID) และกำหนดแถวรอยบุ๋มจำนวน 4 แถวรอบแนวแกนท่อ ทั้งการวางแถวแนวตรงและแนวสลับ



ภาพที่ 2 ส่วนทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนจุดศูนย์กลางร่วม



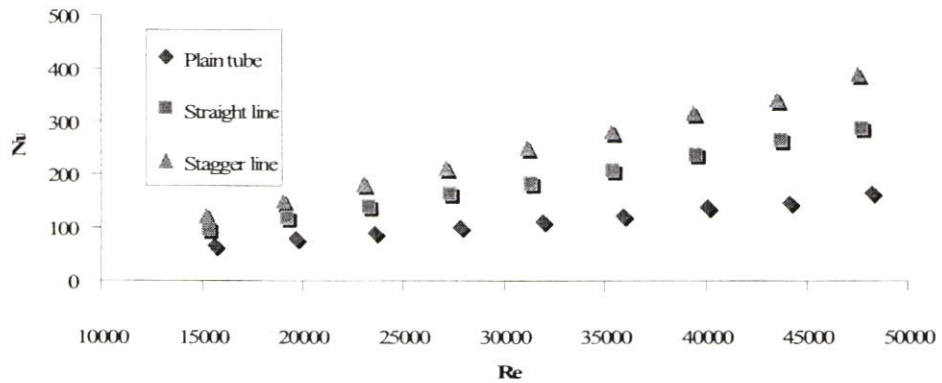
ภาพที่ 3 การวางรอยบุ๋มแนวตรง



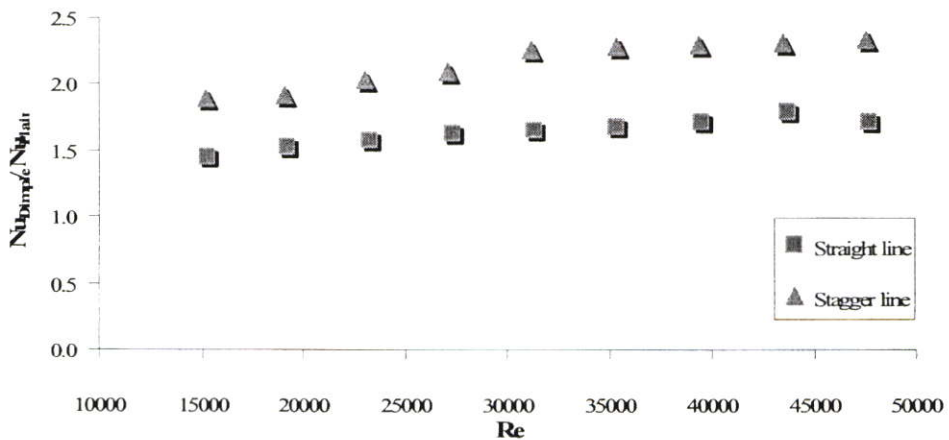
ภาพที่ 4 การวางรอยบุ๋มแนวสลับ

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

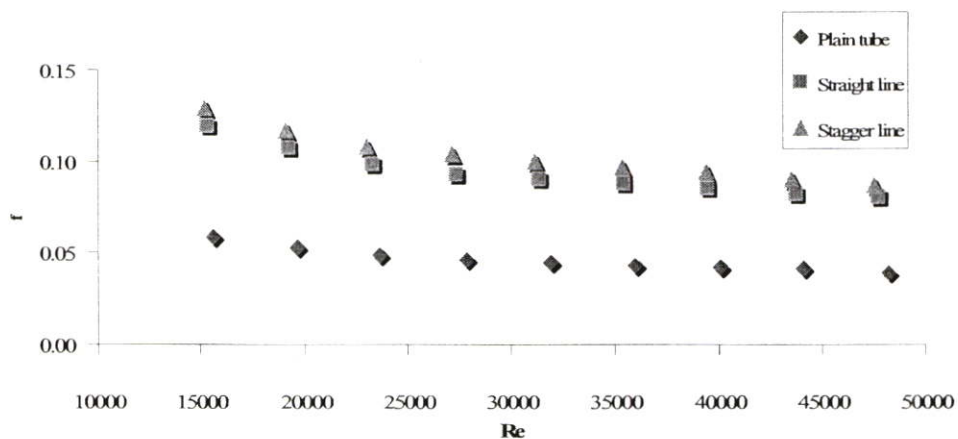
จุดประสงค์การทดลองนี้เพื่อศึกษาผลการเพิ่มของการถ่ายเทความร้อน และผลกระทบของความเสียดทานการไหล จากการสร้างผิวท่อชั้นในให้มีลักษณะเป็นรอยปุ่มแบบแนวตรง (Straight line) และรอยปุ่มแบบแนวสลับ (Stagger line) เปรียบเทียบกับกรณีท่อชั้นในแบบผิวเรียบหรือท่อเปล่า โดยจากผลการทดลอง แสดงในกราฟที่ 1-4 และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ของกรณีการสร้างผิวท่อให้เป็นรอยปุ่มและกรณีการสร้างผิวท่อเป็นผิวคลื่น ที่มีระยะห่าง  $P=1D$  และ  $P=1.25D$  ดังแสดงในกราฟที่ 5 ซึ่งสามารถสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้



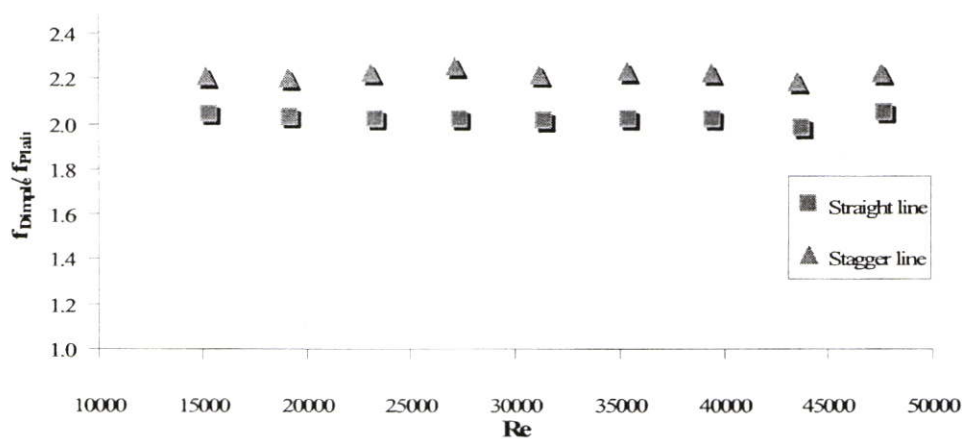
กราฟที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซิลต์กับตัวเลขเรย์โนลด์ของท่อเปล่าและท่อรอยปุ่ม



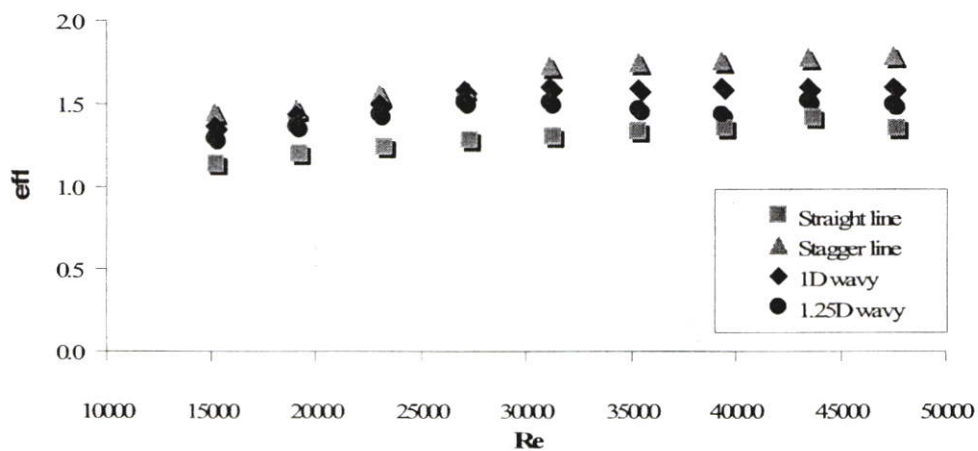
กราฟที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขนัสเซิลต์กับตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่างท่อเปล่าและท่อรอยปุ่ม



กราฟที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับตัวเลขเรย์โนลด์ของท่อเปล่าและท่อรอยขุ่น



กราฟที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่างท่อเปล่าและท่อรอยขุ่น



กราฟที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับตัวเลขเรย์โนลด์ของท่อร้อยบูมและท่อผิวคลื่น

การถ่ายเทความร้อน กรณีท่อชั้นในเป็นแบบผิวเรียบ มีค่าตัวเลขนัสเซลท์ คลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter สำหรับการไหลปั่นป่วนภายในท่อผิวเรียบ โดยที่กรณีท่อชั้นในที่วางร้อยบูมแนวตรง จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 63 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุด 79 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีท่อชั้นในเป็นแบบผิวเรียบหรือท่อเปล่า ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 15,000 – 50,000 และกรณีท่อชั้นในที่วางร้อยบูมแนวสลับ จะมีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่า กรณีท่อชั้นในที่วางร้อยบูมแนวตรง โดยมีค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 116 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุด 134 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีท่อชั้นในเป็นแบบผิวเรียบ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ที่สูงขึ้นนั้น เป็นผลมาจากการรบกวนการไหลของร้อยบูม ทำให้เพิ่มความปั่นป่วนของการไหลบริเวณใกล้ผิวท่อ เป็นการลดความหนาของชั้นขีดยาวการไหลรอบผิวท่อ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น โดยในกรณีร้อยบูมแนวสลับ จะเป็นการเพิ่มแนวตำแหน่งของร้อยบูม จากการวางตำแหน่งร้อยบูมแบบสลับ ทำให้เกิดการรบกวนการไหลได้มากกว่า กรณีท่อชั้นในที่วางร้อยบูมแนวตรง เป็นผลให้สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า

ความเสียดทาน กรณีท่อชั้นในที่วางร้อยบูมแนวตรง จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 102 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 105 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับท่อชั้นในแบบผิวเรียบหรือท่อเปล่า และกรณีท่อชั้นในที่วางร้อยบูมแนวสลับ จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากกว่า กรณีท่อชั้นในที่วางร้อยบูมแนวตรง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 122 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุด 126 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีท่อชั้นในเป็นแบบผิวเรียบ ซึ่งการที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกรณีท่อชั้นในที่วางร้อยบูมแนวสลับ มีค่ามากกว่ากรณีท่อชั้นในที่วางร้อยบูมแนวตรง เนื่องจากแนวตำแหน่งร้อยบูมรอบผิวท่อที่เพิ่มขึ้น จากการวางตำแหน่งร้อยบูมแบบสลับ เป็นการเพิ่มการรบกวนการไหล ทำให้ความเสียดทานเพิ่มมากขึ้น

ประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนคิดเทียบที่การสูญเสียกำลังเนื่องจากการไหลเท่านั้น เทคนิคการสร้างร้อยบูมที่ท่อชั้นในและเทคนิคการสร้างผิวคลื่นที่ท่อชั้นใน พบว่ากรณีท่อชั้นในที่มีร้อยบูมแนวสลับ จะมีประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยดีที่สุด รองลงมาคือกรณีท่อชั้นในที่มีผิวคลื่นระหว่าง  $P=1D$ , ท่อชั้นในผิวคลื่นระหว่าง  $P=1.25D$  และกรณีท่อชั้นในที่มีร้อยบูมแนวตรง โดยมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย 165 เปอร์เซ็นต์ 154 เปอร์เซ็นต์ 145 เปอร์เซ็นต์ และ 129 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

## สรุป

การทดลองเพื่อศึกษาผลการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน ด้วยวิธีการสร้างร้อยบูมที่ผิวท่อชั้นใน อิทธิพลจากร้อยบูมทำการรบกวนการไหลบริเวณใกล้ผิวท่อให้เกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ตลอดแนวการไหลผ่านชุดทดสอบ โดยสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน จากการไหลแบบปั่นป่วนรอบผิวท่อทำให้ความหนาของชั้นขีดยาวการไหลรอบผิวท่อลดลง ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่ากรณีการไหลผ่านท่อที่มีผิวเรียบ โดยกรณีท่อชั้นในที่วางร้อยบูมแนวสลับจะสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด โดยมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุด 134 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีท่อชั้นในเป็นแบบผิวเรียบ และเพิ่มขึ้น 36 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีวางร้อยบูมแนวตรง เนื่องจากแนวตำแหน่งของร้อยบูมที่มีมากกว่ากรณีวางแนวตรง เป็นการช่วยเพิ่มการไหลให้ปั่นป่วนมากขึ้น อย่างไรก็ตามการวางร้อยบูมแนวสลับก็มีผลทำให้ความเสียดทานการไหลเพิ่มขึ้นมากกว่าเช่นกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ระหว่างเทคนิคการสร้างร้อยบูมและเทคนิคการสร้างผิวคลื่นที่ท่อชั้นใน ซึ่งเป็นวิธีการเพิ่มความปั่นป่วนการไหลรอบผิวท่อเช่นเดียวกัน พบว่าเทคนิคการสร้างร้อยบูมแนวสลับมีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมี

ประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 179 เปอร์เซ็นต์ และจากผลการศึกษานี้สามารถเป็นอีกหนึ่งแนวทางเพื่อการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมในการเพิ่มสมรรถนะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่น ๆ ให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

#### เอกสารอ้างอิง

- รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงษ์ (2534). การถ่ายเทความร้อน . ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ . คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- นิติเวช ทองนุช (2548). วิทยานิพนธ์. การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน โดยใช้แผ่นกีดแบ่ง  
เป็นช่วงในท่อ. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สมศักดิ์ เพ็ชรกุล, พงษ์เจต พรหมวงษ์ (2550). การศึกษาเชิงทดลองของการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยน  
ความร้อนโดยใช้ท่อฉนวนกลีเยว. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21
- Holman,JP (1989). Heat Transfer. McGraw-Hill. Newyork
- C. Yildiz, Y. Bicer , D. Pehlivan (1996) . Applied Energy 54(1), 49
- E. K. Akpınar, Y. Bicer (2005) . International Journal of Thermal Sciences 44 , 598–607
- J. Chen , H. Muller-Steinhagen, Geoffrey G. Dufy (2001). Applied Thermal Engineering 21 535±547
- G.F. Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott (1994) . Process Heat Transfer . CRC Press . Florida

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

นายบุษนา ศรีผา

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2543

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ประวัติการทำงาน

พ.ศ.2543-พ.ศ.2547

วิศวกรเครื่องกล/พลังงาน - บริษัท กรีน เอ็นเนอร์ยี จำกัด

พ.ศ.2548-ปัจจุบัน

วิศวกรเครื่องกล - บริษัท แอ็คมี อินเตอร์เนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด