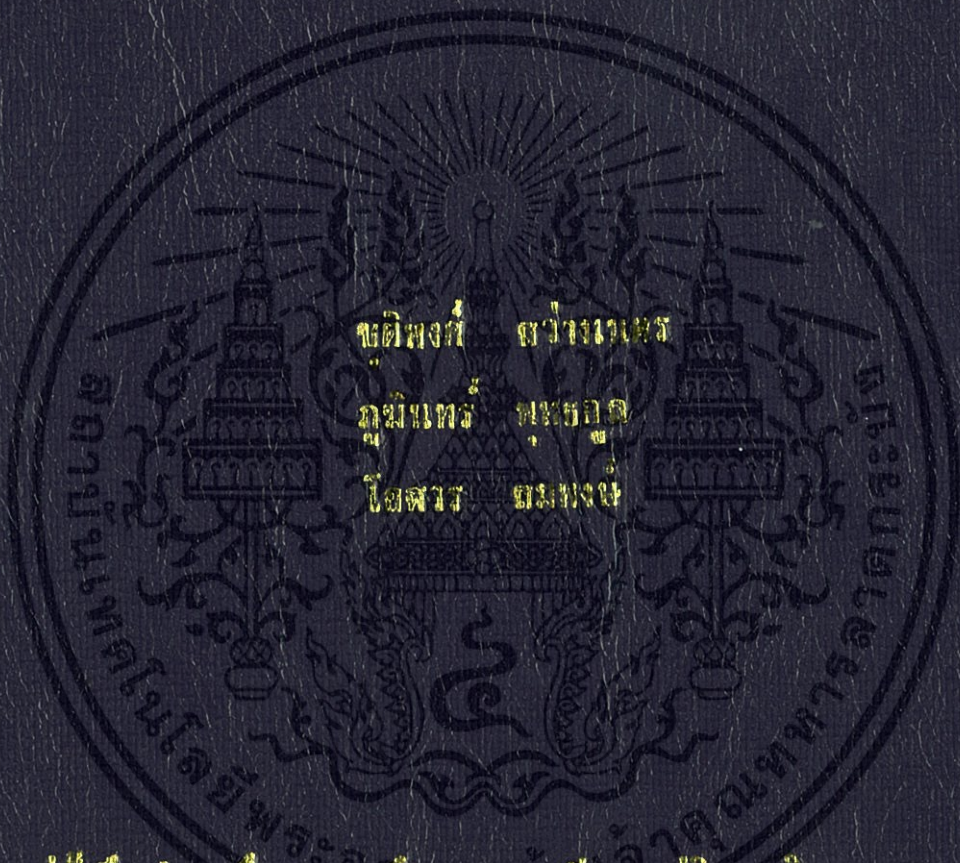


พฤติกรรมการณ์เป็นความร้อนในท่อของที่มีการติดซี่โครงโค้งตัว  
HEAT TRANSFER BEHAVIORS IN A ROUND TUBE WITH  
CURVED V-SHAPED RIBS



ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการติดตั้งครีบอกโค้งตัววี

Heat transfer Behaviors in a round tube with curved V-shaped ribs



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Heat transfer Behaviors in a round tube with curved V-shaped ribs



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการติดตั้งครีบอกโค้งตัววี  
Heat transfer Behaviors in a round tube with curved V-shaped ribs

ผู้จัดทำ

1. นาย ชุตติพงศ์ สว่างเนตร รหัสประจำตัว 53010377
2. นาย ภูมินทร์ พุทธกุล รหัสประจำตัว 53011264
3. นาย โอฬาร สมพงษ์ รหัสประจำตัว 53011970



( ผศ.ชิตพิพัทธ์ ลิ้มกุล )

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการติดตั้งครีบอกังตัววี

นายชุตติพงศ์	สว่างเนตร	53010377
นายภูมินทร์	พุททกุล	53011264
นาย โอสถ	สมพงษ์	53011970
ผศ. ธิติพัทธ์	ลิ้มกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2556		

### บทคัดย่อ

รายงานนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีการติดตั้งโครงครีบอกังตัววีโดยอัดอากาศเข้าไปในท่อกลม เมื่ออากาศไหลผ่านโครงที่ติดครีบอกังนั้นจะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทความร้อนโดยจะทำการทดลองในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynold number: Re) ต่าง ๆ คือ ช่วงระหว่างเลขเรย์โนลด์ 5,300 ถึง 24,000 โดยอากาศที่ถูกสร้างขึ้นจะไหลผ่านท่อและช่วงทดลองที่จะมีสภาวะการให้พลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผิวของช่วงทดลอง และภายในท่อนั้นประกอบด้วยโครงครีบอกังตัววีจะปรับมุมเข้าปะทะ 3 มุมคือ 90°, 60° และ 45° ซึ่งในแต่ละมุมเข้าปะทะจะมีการแยกมุมระหว่างส่วนโค้งของครีบอกังเป็น 2 มุม คือมุม 120° และ 90° กกับการวางระยะห่างระหว่างครีบอกังตัววี คือ PR = 0.5 และ 1 ค่าการบล็อกการไหล BR= 0.1 และ 0.2 จากการทดลองจะแสดงค่าในรูปของเลขนัสเซลท์ (Nusselt number: Nu) และตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor: f) จากการติดตั้งโครงครีบอกังตัววีที่การใช้มุมเข้าปะทะ 45° จะทำให้เลขนัสเซลท์มากที่สุดคือ 2.95 เท่า และทำค่าตัวประกอบเสียดทานสูงสุดคือ 10.93 เท่า สำหรับส่วนโค้งของครีบอกัง 120°, BR = 0.2 และ PR = 0.5 ที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 5,364

## Heat transfer Behaviors in a round tube with curved V-shaped ribs

Chutipong	Sawangnetr	53010377
Phukin	Puttagool	53011264
Oran	Sompong	53011970
Assis.Prof.Thitipat	Limkul	Advisor
Assoc.Prof.Dr.Pongjet	Promvonge	Co.Advisor
Year 2556		

### ABSTRACT

The purpose of this project is to study on heat transfer and friction loss characteristics in the round tube are investigated by curve v-shaped ribs. Air flow passing thought the test section by blower to create vortex flow. This cause of influence to enhancement heat transfer rate. In the experimental .Taken the Reynold number between 5,300 to 24,000 and under the uniform wall heat flex condition. The curve v-shaped ribs tested into 3 difference attack angle  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $45^\circ$  and in each attack angle separate curve angle into 2 angle is  $120^\circ$  and  $90^\circ$  and in each type used length between two curve v-shaped call pitch ratio  $PR = 0.5$  and  $1$  and height of impact surface call block ratio  $BR = 0.1$  and  $0.2$  .The experimental result are displayed in terms of Nusselt number and friction factor as a function of Reynold number. Form the values of Nusselt number and friction factor both increasing with curve v-shaped ribs turbulator. The use of attack angle  $45^\circ$  leads to highest Nusselt number 2.95 time and friction factor 10.93 time for curve angle  $120^\circ$ ,  $BR = 0.2$  and  $PR = 0.5$  at Reynold number 5,364.

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือความเอาใจใส่ จากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ธิตีพิพัทธ์ ลิ้มกุล รวมทั้ง รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณสาขาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์เพื่อการศึกษาต่าง ๆ รวมทั้ง นายสุรียา โชคพรหมมุน ในการเป็นผู้ให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์นี้

ข้าพระเจ้าขอบพระคุณ พ่อ แม่ รวมทั้งครอบครัว ที่เป็นบุคคลสำคัญในการสนับสนุนด้านการศึกษาลีงดูเป็นอย่างดี และให้กำลังใจเสมอมาตลอดการศึกษา พร้อมทั้งยังเอาใจใส่พวกรข้าพระเจ้าตลอดมาอันหาที่เปรียบไม่ได้ ดังนั้นข้าพระเจ้าขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นายชุตีพงศ์ สว่างเนตร  
นายภูมินทร์ พุทธกุล  
นาย โอฟาร สมพงษ์



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 โครงร่างวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย.....	9
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	10
3.1 บทนำ.....	10
3.2 กลศาสตร์ของไหล.....	10
3.2.1 สภาวะการไหล.....	11
3.2.2 ความเร็วเฉลี่ย.....	12
3.2.3 รูปร่างของความเร็วยังของไหลที่ปรับตัวเต็มที่.....	12
3.2.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหล แบบปรับตัวเต็มที่.....	14
3.3 การถ่ายเทความร้อน.....	15
3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย.....	17
3.3.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่.....	17
3.4 การสมดุลของพลังงาน.....	18
3.5 สหสัมพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบราบเรียบในท่อกลม.....	19
3.6 สหสัมพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม.....	21
3.7 การเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน.....	22
3.8 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน.....	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	24
4.1 บทนำ.....	24
4.2 การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลอง.....	24
4.2.1 เครื่องอัดอากาศ.....	24
4.2.2 ท่อทางเข้าชุดทดลอง.....	25
4.3 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง.....	25
4.3.1 ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม.....	26
4.3.2 เครื่องอัดอากาศ.....	26
4.3.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ.....	27
4.3.4 ถังพักลม.....	28
4.3.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	29
4.3.6 เครื่องวัดความดันตกคร่อม.....	30
4.3.7 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ.....	30
4.4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง.....	31
4.4.1 อุปกรณ์ชุดทดลอง.....	31
4.4.2 อุปกรณ์ติดตั้งปีกบางที่ใช้ทดลอง.....	32
4.5 วิธีการทดลอง.....	32
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	33
5.1 บทนำ.....	33
5.2 ผลการทดสอบท่อผนังเรียบ.....	33
5.3 การทดลองโดยศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่แตกต่างกัน.....	35
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์.....	38
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบเสียดทาน กับเลขเรย์โนลด์.....	40
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของถ่ายเทความร้อนกับ เลขเรย์โนลด์.....	42
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	44
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	44
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
บรรณานุกรม.....	47
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ.....	50
ภาคผนวก ข. ออร์ฟิส.....	52
ภาคผนวก ค. เครื่องวัดความดันตกคร่อม.....	57

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
6.1 ตารางแสดงผลการทดลองในแต่ละกรณีศึกษา.....	45
ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ.....	51



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงลักษณะตัววีมุม 45°	5
2.2 โครงสร้างช่องขนานและโดเมนการคำนวณเชิงตัวเลข	6
2.3 แผ่นทดสอบของ สกูลหลง	8
2.4 ครีบก้นรูปตัววีมุม 45°	9
3.1 รูปแสดงการก่อตัวของขอบเขตการไหลของการไหลในท่อกลม	11
3.2 สมดุลแรงบนอิเลเมนต์ดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ก่อตัวเต็มที่ในท่อกลม	13
3.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่ในท่อกลม	16
3.4 การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม	16
3.5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายใน	18
3.6 ต้นแบบการถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งครีบก้นตัววีในท่อกลม	23
4.1 ชุดทดลองที่ใช้ทดลอง	26
4.2 อุปกรณ์ติดตั้งที่ใช้ทดลอง	26
4.3 พัดลมแรงดันสูง	27
4.4 อินเวอร์เตอร์	27
4.5 ออร์ฟิส มิเตอร์	28
4.6 เครื่องวัดความดันแบบปรมาณูเสียง	28
4.7 ถังพักลม	29
4.8 เครื่องเก็บข้อมูล	29
4.9 เทอร์โมคัปเปิล	29
4.10 เครื่องวัดความดันตกคร่อม	30
4.11 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ	30
4.12 แผนผังของชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม	31
5.1 กราฟการเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซลล์ท์ของท่อเปล่ากับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter	34
5.2 กราฟการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อเปล่ากับสหสัมพันธ์ของ Blasius	34
5.3 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนที่มุมปะทะ 90°	35
5.4 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนที่มุมปะทะ 60°	36
5.5 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนที่มุมปะทะ 45°	36
5.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานที่มุมปะทะ 90°	37
5.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานที่มุมปะทะ 60°	37
5.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานที่มุมปะทะ 45°	38
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ ของมุมเข้าปะทะ 90°	39
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ ของมุมเข้าปะทะ 60°	39
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ ของมุมเข้าปะทะ 45°	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบเสียดทาน กับเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ $90^\circ$ .....	40
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบเสียดทาน กับเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ $60^\circ$ .....	41
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบเสียดทาน กับเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ $45^\circ$ .....	41
5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน กับค่าเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ $90^\circ$ .....	42
5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน กับค่าเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ $60^\circ$ .....	43
5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน กับค่าเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ $45^\circ$ .....	43
ข-1 Type of Pressure meter.....	53
ข-2 Standard orifice plate.....	53
ข-3 โครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิส.....	54
ข-4 การไหลผ่านแผ่นออริฟิส.....	54
ข-5 ออริฟิสแบบต่าง ๆ .....	55
ค-1 Differential Pressure Gages.....	58
ค-2 Differential Pressure Switches-Digital.....	58
ค-3 Differential Pressure Switches analog.....	58
ค-4 Differential Pressure monitor.....	59
ค-5 Gage/Switches-Digital Manometers.....	59
ค-6 Digital Manometers.....	59
ค-7 Fluid Filled Manometers.....	60

# รายการคำย่อและสัญลักษณ์

## สัญลักษณ์ตัวอักษรลาติน

A	พื้นที่การพาความร้อนของท่อ, $m^2$
$A_c$	พื้นที่หน้าตัด, $m^2$
$A_s$	พื้นที่ผิว, $m^2$
BR	อัตราส่วนการปิดกั้นการไหล ( $\frac{C}{D}$ )
$C_f$	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน, $\frac{J}{kg \cdot K}$
$C_p$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่, $\frac{J}{kg \cdot K}$
$C_v$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหลที่ปริมาตรคงที่, $\frac{J}{kg \cdot K}$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m
e	ความสูงปีก, m
f	ตัวประกอบเสียดทาน
$\bar{f}$	ตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ย
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
i	กระแสไฟฟ้า, A
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
L	ความยาวของส่วนทดสอบ, m
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, $\frac{kg}{s}$
Nu	เลขนัสเซลท์
$\bar{Nu}$	เลขนัสเซลท์เฉลี่ย
n	ค่าคงที่
P	ระยะพิตซ์ตามยาว, m
$P_e$	ความยาวเส้นรอบรูป, m
$P_t$	ระยะพิตซ์ตามขวาง, m
Pr	เลขพรานด์
PR	อัตราส่วนระยะพิตซ์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ $\frac{P}{D}$
p	ความดันของไหล, $\frac{N}{m^2}$
$\Delta P$	ความดันตกคร่อม, $\frac{N}{m^2}$
Q	ค่าการถ่ายเทความร้อน, W

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$q_{conv}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด, W
$q_s''$	ฟลักซ์ความร้อนที่ผิว, $\frac{W}{m^2}$
R	ค่าคงที่ของก๊าซ, $\frac{J}{kg \cdot K}$
Re	เลขเรย์โนลด์ ( $\frac{UD}{\nu}$ )
r	รัศมีที่ตำแหน่งใด ๆ, m
$r_0$	รัศมีท่อกลม, m
St	เลขสแตนตัน
T	อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใด ๆ, °C
$T_b$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, °C
$T_m$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ, °C
$T_{m,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางเข้า, °C
$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางออก, °C
$T_s$	อุณหภูมิเฉลี่ยผิวท่อ,
TEF	ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน
$\overline{TEF}$	ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ย
$\bar{U}$	ความเร็วเฉลี่ย, $\frac{m}{s}$
$U_x$	ความเร็วตามแนวแกน x, $\frac{m}{s}$
$U_m$	ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ, $\frac{m}{s}$
V	ความต่างศักย์ไฟฟ้า, V
$\dot{V}$	อัตราการไหลเชิงปริมาตร, $\frac{m^3}{s}$
$\bar{V}$	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, $\frac{m}{s}$
$V_r$	ความเร็วตามแนวแกน r, $\frac{m}{s}$
$\dot{W}_{in}$	การจ่ายกำลังให้พัดลม, $\frac{J}{s}$
x	ความยาวที่ตำแหน่งใด ๆ, m
$x_{fd}$	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัวเต็มที่, m
$x_{fd,h}$	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัว, m
$x_{fdt}$	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัวเต็มที่ของความร้อน, m

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

### สัญลักษณ์ตัวอักษรกรีก

$\rho$	ความหนาแน่นของอากาศ, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$v$	ความหนืดเชิงจลน์, $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
$\alpha$	มุมปะทะของปีก ( $^\circ$ , degree)
$\beta$	มุมโค้งของครีบ ( $^\circ$ , degree)
$\mu$	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล, $\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$
$\mu_s$	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหลที่ผิว, $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
$\tau_r$	ความเค้นเฉือนในแนวรัศมี, $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
$\tau_s$	ความเค้นเฉือนบนผิว, $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

### สัญลักษณ์ตัวห้อย

0	ผนังเรียบ
i	เข้า
o	ออก
pp	กำลังเครื่องเป่า

# บทที่ 1 บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นในอุตสาหกรรม ตั้งแต่ขนาดเล็กจนไปถึงขนาดใหญ่ ด้านอุตสาหกรรมได้นำเอาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาประยุกต์ใช้ในระบบมากมาย ทั้งมีการแข่งขัน และพัฒนาสินค้าหรือผลิตภัณฑ์มากขึ้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงต้องมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย เทคโนโลยีในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจึงสำคัญอย่างยิ่งยวดต่อการออกแบบ และประยุกต์ใช้งานได้อย่างมากมาย อาทิ เช่น เครื่องอบแห้ง เตาเผา เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แผงระบายความร้อน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องทำความเย็น เครื่องกลั่น เครื่องควบแน่น เครื่องยนต์ เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม เป็นต้น หลักการออกแบบอุปกรณ์หรือระบบที่มีการถ่ายเทหรือแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่ต้องการ เช่น สามารถทำงานได้ตามความต้องการ ราคาถูก สมรรถนะในการถ่ายเท และแลกเปลี่ยนความร้อนสูง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด อายุการใช้งานที่ยืนยาว ต้องบำรุงรักษาซ่อมแซมน้อย รวมทั้งมีความน่าเชื่อถือ และปลอดภัยสูง เพื่อให้บรรลุคุณลักษณะที่ต้องการเหล่านี้ พื้นฐานสำคัญคือการพัฒนาขีดความสามารถ และศักยภาพของระบบถ่ายเทความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อลดการใช้พลังงาน มีขนาดที่เหมาะสมกะทัดรัด ทำให้ลดการใช้วัสดุ และพื้นที่ติดตั้งใช้งาน ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน เพราะทำให้การจัดสรร และใช้ทรัพยากรเชื่อเพลิง และวัสดุอย่างคุ้มค่ารวมทั้งลดภาวะโลกร้อน

ในปัจจุบันท่อที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ล้วนต้องมีท่อบรรูปแบบหน้าตัดต่าง ๆ เช่น สี่เหลี่ยมหรือวงกลมซึ่งมีระบบการถ่ายเทความร้อนอยู่ตลอดเวลา ถ้าโรงงานนั้น ๆ ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนนั้นก็ได้หลายวิธี เช่น เพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนหรือไม่ว่าจะเป็นการทำให้อากาศนั้นไหลแบบปั่นป่วน

ในปัจจุบันนี้มีการประดิษฐ์ และพัฒนาอุปกรณ์จำลองการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อที่ศึกษาการเพิ่มค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยธรรมชาติแล้วหากเราต้องการที่จะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงนั้นต้องทำให้ของไหลมีการไหลวนหรือแบบปั่นป่วน กล่าวคือ การไหลแบบปั่นป่วน ในทางทฤษฎี จะต้องเป็นการไหลที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ที่สูงกว่าค่าเลขเรย์โนลด์วิกฤต ซึ่งเป็นค่าที่ของไหลเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์แปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ดังนั้นยิ่งทำให้ค่าเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นมากเท่าไรจะยิ่งทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น

ซึ่งวิธีที่ทำให้ค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นนั้นมีหลายวิธียกตัวอย่างเช่น การเพิ่มความเร็วของการไหล, เพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน, การเปลี่ยนรูปแบบการไหลของอากาศในท่อหรือแม้แต่เอาแผ่นมากันเพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลเป็นการไหลในลักษณะที่แตกต่างไปโดยจะเกิดเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งการวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีเอาแผ่นมาวางภายในท่อทำให้เกิดปะทะระหว่างของไหลภายในท่อกับแผ่นที่นำมาวางภายในท่อ ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน การนำแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างของไหลภายในท่อ กับแผ่นที่นำมาวางภายในท่อ ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน การนำแผ่นติดตั้ง (insert) มากวางภายในท่อนั้นมีหลากหลายรูปแบบ ดังนั้นการทดลองนี้จะเป็นการวัดค่าว่าแผ่นติดตั้งรูปแบบใดที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่ากัน รวมถึงประสิทธิภาพรวมด้วย โดยที่แผ่นติดตั้งนั้นจะมีรูปแบบต่างกันกล่าวคือ มุมของตัวแผ่น ติดตั้ง, มุมระหว่างแผ่นบน และล่าง, พื้นที่ผิวหน้าประทะ โดยจะนำค่ามาเปรียบเทียบกัน ทั้งในการทดลอง และทางทฤษฎี โดยการทดลองนั้นจะใช้เครื่องเป่าอากาศ ในการเป่าอากาศเข้าไปในท่อกลมที่มีโครงที่ติดแผ่นติดตั้งขวางการไหลอยู่ เพื่อให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นแต่ผลที่ตามมาคือจะทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน อากาศไหลแบบปั่นป่วนไปสัมผัสกับผิวท่อมากขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนที่ผิวเกิดได้ดีขึ้นด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยการติดตั้งโครงที่ติดครีบอกังตัววีลงไปในท่อกลม
2. วิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ ได้แก่ ความเร็วลม มุมกระทำของตัววี ความโค้งของครีบอกัง ค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างตัวติดตั้ง และค่าอัตราส่วนบล็อกการไหล ที่มีผล
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่ติดตั้งครีบอกังตัววี

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การสร้างความปั่นป่วนของของไหลภายในท่อ จะสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ และมีผลทำให้สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น จึงนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไปได้

## 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. จำลองการไหลของอากาศในลักษณะที่มีโครงที่ติดครีบอกังตัววี
2. ศึกษาภายใต้การให้ค่าความร้อนคงที่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5,300-24,000
3. ศึกษาความสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อน และค่าตัวประกอบเสียดทาน

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ค้นคว้างานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนในท่อกลม
2. วิเคราะห์ปัญหา และกำหนดแนวทางการแก้ปัญหาของการแลกเปลี่ยนความร้อน
3. ออกแบบตัวติดตั้งในที่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะกรณีเพื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างการถ่ายเทความร้อนในแต่ละกรณี
4. ดำเนินการทดลองโดยเปลี่ยนรูปแบบค่า พารามิเตอร์ ได้แก่ ความเร็วของอากาศ รูปแบบของโครงที่ติดครีบอกังตัววี มุมปะทะ มุมโค้งรูปตัววี ค่าอัตราส่วนบล็อกการไหล และระยะห่างระหว่างครีบอกังติดตั้ง
5. วิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการทดลอง และเปรียบเทียบ
6. สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ข้อเสนอแนะที่ควรทำวิจัยต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ
2. พัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น
3. เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนา และออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งในภาคอุตสาหกรรม และการประยุกต์ใช้งานในภาคการเกษตรกรรม
4. ประหยัดพลังงานลดขนาด และการใช้วัสดุในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต เกิดประโยชน์ทั้งในแง่พื้นที่การติดตั้ง ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และราคาที่ต่ำลง

## 1.7 โครงร่างวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาข้อมูล และเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมกรไหลของอากาศ และผลของรูปร่างครีบนำไปประยุกต์ใช้ในท่อกลม
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหล และการถ่ายเทความร้อน
3. ออกแบบ และสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยสร้างครีบบัควิวที่โดยกำหนดปีกทำมุมเข้าปะทะ  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  และ  $90^\circ$  ซึ่งในแต่ละมุมตัววีจะมีการแยกพับมุมโค้งระหว่างแผ่นบน และแผ่นล่างเป็น 2 มุม คือมุม  $120^\circ$  และ  $90^\circ$  มีสัดส่วนความสูงของปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ BR = 0.1 และ 0.2 มีระยะพิชช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง PR = 0.5 และ 1.0
4. ศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนโดยแสดงในเทอมของเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) และค่าการสูญเสียความดันโดยแสดงในเทอมของตัวประกอบความเสียดทาน (Friction Factor)
5. สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทรรศน์

### 2.1 บทนำ

จากการสืบค้นนั้นได้ทราบว่ามีการทำแบบจำลองของท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในหลายรูปแบบ โดยหลังจากนั้นก็ยังมีการศึกษาทางด้านของการเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อนโดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ ใส่ลงในช่วงทดลองที่ให้ความร้อนอย่างคงที่

### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yakut, K. and B. Sahin. [1] เกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดจากการไหล โดยการใส่วงแหวนรูปกรวยตัดเข้าไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมุ่งไปที่การเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยตัดที่ใส่เข้าไปในช่วงทดลองแล้วให้อากาศไหลผ่านเกิดการไหลแบบไหลวน โดยที่ความไหลวนจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าระยะห่างระหว่างตัวติดตั้งต่ำและได้สรุปไว้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่เพิ่มขึ้นนั้นจากการไหลวนทำให้อากาศไหลดีที่ผิวของช่วงทดลองได้มากกว่าโดยที่อัตราการพาความร้อนเพิ่มขึ้น 2.5 เท่า

Tan, X.-h., et al. [2] ได้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน และ ความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นจากติดตั้งใบพัดลงในท่อกลมเป็นการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ศึกษาการทำให้ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน และลดความดันตกคร่อมเมื่อใส่ใบพัดไปภายในพบว่าทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนลดความดันตกคร่อมนั้นเพิ่มขึ้นจะมากกว่าท่อเปล่าทั้งสองตัวแปร

Promvongse, P. and S. Eiamsa-ard [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับท่อกลมที่ใส่โครงนัสเซลล์ล์ รูปตัววีเข้าไป โดยจะเน้นศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบแรงเสียดทานที่เปลี่ยนไป เนื่องจากใส่ตัววีจากผลการทดลองการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบเสียดทานจะมากขึ้นตาม เกิดขึ้นโดยเฉพาะที่ระยะห่างระหว่างครีบริบรูปตัววี นั้นขึ้นอยู่กับสถานการณ์ไหล และระยะห่างระหว่างแผ่นติดตั้งด้วย พบว่าประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นนั้นจะเกิดที่ค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำโดยค่าอัตราการพาความร้อนเพิ่มขึ้น 2.94 เท่า

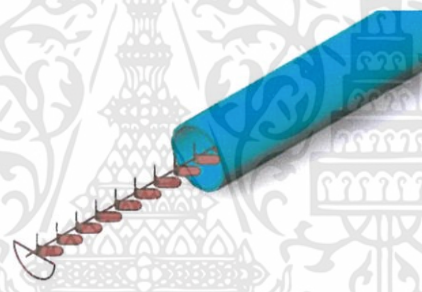
Lee, D.H., et al. [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใส่ตัวติดตั้งที่เป็นแผ่นที่ติดในลักษณะตัววี เข้าไปในท่อสี่เหลี่ยมเพื่อที่จะดูการเปลี่ยนไปของ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนความร้อน ทำการทดลองโดยแบ่งมุมตัว วี เป็น 2 มุมคือ 60°, 45° ผลการทดลองที่ได้ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับ มุมของตัววี ความยาว และระยะระหว่างชิ้นงานโดยที่มุม 60° ได้อัตราการพาความร้อนดีที่สุด

Han et al. [5] ทำการศึกษาผลของรูปทรงครีบริบ, มุมครีบริบ และอัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูง มีผลต่อตัวประกอบเสียดทาน และการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีครีบริบติดบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม ที่ค่าเลขเรย์โนลด์  $Re = 3,000-30,000$  พบว่า การจัดครีบริบแบบสมมาตรมีผลเหมือนกับการจัดครีบริบแนวเอียงกัน และรูปร่างของครีบริบมีผลอย่างมากต่อตัวประกอบเสียดทาน และมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนไม่มากนัก จากผลการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเมื่อครีบริบมีมุม 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ahn [6] ทำการศึกษาผลกระทบของครีบริบบแบบต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และค่าตัวประกอบเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยม โดยทำการศึกษารูปทรงครีบริบ 5 ชนิด ได้แก่ ครีบริบสี่เหลี่ยม ครีบริบรูปสามเหลี่ยม ครีบริบวงกลม ครีบริบครึ่งวงกลมทรงต่ำ และครีบริบครึ่งวงกลมทรงสูง โดยทำการศึกษาที่ความสูงครีบริบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $e/D_h$ ) เท่ากับ 0.0476 อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบริบ ( $P/e$ ) เท่ากับ 8 และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ 2.33 และรูปแบบครีบริบดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากการทดลองพบว่า แผ่นครีบริบสามเหลี่ยมมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ตามด้วยครีบริบสี่เหลี่ยม ส่วนครีบริบวงกลม และครีบริบครึ่งวงกลมมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน โดยที่ช่วงค่าเลขเรย์โนลด์  $Re = 10,000$  แผ่นครีบริบสามเหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นเรียบ 3 เท่า ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์  $Re = 20,000$  จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมพบว่าแผ่นครีบริบสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมมากที่สุด ตามด้วยแผ่นครีบริบสี่เหลี่ยม

Promvonge [7] ได้ศึกษาผลกระทบในท่อกลมเนื่องจากการใส่อุปกรณ์ติดตั้งโครงลักษณะ v-shaped ซึ่งผลการทดลองได้สรุปว่าค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 2.87 เท่า และค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 12.4 ที่มุมเข้าปะทะเท่ากับ  $45^\circ$  ถึงได้พบว่าการเพิ่มขึ้นสูงสุดของประสิทธิภาพเป็น 1.34



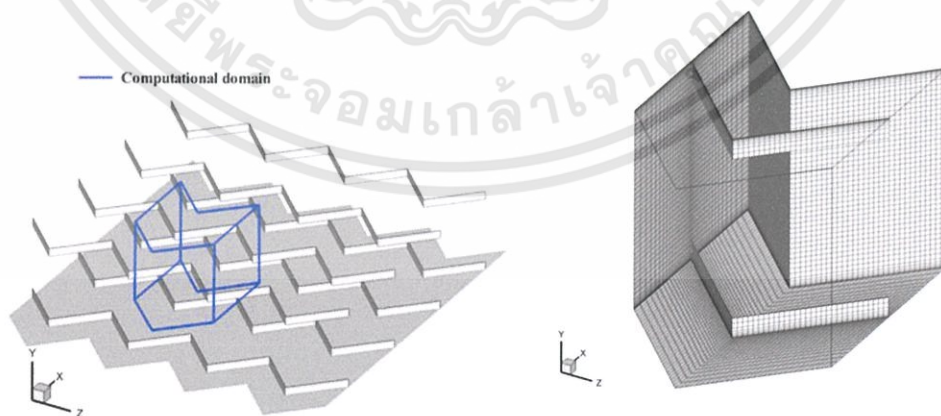
รูปที่ 2.1 โครงลักษณะตัววีมุม  $45^\circ$

Ahmet and Teoman [8] ได้ทำการศึกษาวិเคราะห์การนำเพื่อที่จะไปเพิ่มประสิทธิภาพของท่อกลมด้วยการติดตั้งชิ้นงานชื่อว่า Baffle plate โดยจะศึกษาที่ตัวพารามิเตอร์ต่างๆกันไป PR, BR,  $\beta=45^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  ที่ทดลองในของไหล โดยใช้สแตนเลสเป็นวัสดุติดของท่อ ซึ่งจะศึกษาไปที่ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และพลังงาน พบว่าพลังงานเพิ่มขึ้นมากกว่าท่อเปล่าทรงกลม

ทำนา [9] นำเสนอการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีอุณหภูมิผิวคงที่ โดยมีการติดตั้งแผ่นกั้นวางขวาง แผ่นกั้นวางเอียง และแผ่นกั้นวางเอียงรูปตัววีที่ผนังทั้งสองด้านของท่อ ซึ่งมีการวางแผ่นกั้นแบบตรงกัน โดยแผ่นกั้นวางเอียงที่ติดตั้งนั้นมีลักษณะการจัดวางเอียงทำมุมปะทะที่  $\alpha = 20^\circ, 30^\circ$  และ  $45^\circ$  ตามลำดับ และมีค่าอัตราส่วนการปิดกั้นการไหล (Blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 ตามลำดับ ส่วนแผ่นกั้นวางเอียงรูปตัววีมีลักษณะการจัดวางเอียงทำมุมปะทะที่  $\alpha = 30^\circ$  และมีค่าอัตราส่วนการปิดกั้นเดียวกันกับแผ่นกั้นวางเอียง การไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีพิจารณา 2 กรณี คือกรณีปลายวีชี้ตามทิศทางการไหล และกรณีปลายวีชี้ทวนทิศทางการไหล ในการคำนวณใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม และเลือกลำดับวิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE ซึ่งการจำลองนี้ได้นำเสนอคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการไหลของของไหลสำหรับเลขเรย์โนลด์บนพื้นฐานเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่วงจาก  $Re = 100$  ถึง 1,000 และได้ศึกษาผลของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นกั้นต่อการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดันในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผลลัพธ์ที่ได้จากท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดแผ่นกั้นถูกนำไปเปรียบเทียบกับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ พบว่า ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดแผ่นกั้นจะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการปิดกั้นทำให้ค่าเลขนัสเซิลท์ และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น จากลักษณะการจัดวางแผ่นกั้นพบว่า แผ่นกั้นวางเอียงรูปตัววีเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแผ่นกั้นวางเอียง และแผ่นกั้นวางขวาง โดยแผ่นกั้นวางเอียงรูปตัววีที่  $\alpha = 30^\circ$  แบบปลายวีชี้ทวนทิศทางการไหลให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบปลายวีชี้ตามทิศทางการไหล และผลลัพธ์จากการคำนวณยังพบว่า แผ่นกั้นรูปตัววีแบบปลายวีชี้ทวนทิศทางการไหลที่  $BR = 0.125$  มีค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 3.33

Sripattanapipat [10] นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อน และพฤติกรรม การไหลแบบราบเรียบในช่องการไหลที่มีอนุกรมผิวคกงที่ โดยมีการติดตั้งแผ่นกั้นรูปคลื่นแบบสามเหลี่ยมที่ผนังผิวบน และผิวล่างตรงกัน ซึ่งมีมุมปะทะ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  และ  $90^\circ$  ตามลำดับ และมีอัตราส่วนการปิดกั้นการไหล (Blockage ratio, BR) ตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.30 สำหรับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น (Pitch ratio, PR) จะให้เป็น 1.0 สำหรับกรณี มุมปะทะ  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  และ  $90^\circ$  ส่วนมุมปะทะ  $30^\circ$  จะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นตั้งแต่ 0.5 ถึง 2.0 ในการศึกษาใช้อัตราการไหลที่ใช้จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 100 จนถึง 1,000 ในการจำลองจะใช้โปรแกรม FLUENT ในการคำนวณ ผลที่ได้จะนำเสนออยู่ในรูปร่างของสนามการไหล และการถ่ายเทความร้อน จากผลลัพธ์ที่ได้จากช่องการไหลที่มีการติดแผ่นกั้นถูกนำไปเปรียบเทียบกับช่องการไหลผิวเรียบ พบว่า ช่องการไหลที่มีการติดแผ่นกั้นจะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าช่องการไหลผิวเรียบ การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการปิดกั้นการไหล ทำให้ค่าเลขนัสเซิลท์ และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการวิเคราะห์สนามการไหลพบว่า เมื่อมุมปะทะของแผ่นกั้นมีขนาดเล็กลง จะทำให้เกิดการหมุนวนตามทิศทางการไหลซึ่งจะช่วยเพิ่มการถ่ายความร้อน ในขณะที่เดียวกัน การสูญเสียความดันก็จะลดลงอีกด้วย ทำให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (TEF) ของแผ่นกั้นรูปคลื่นสูงกว่าแผ่นกั้นขวางที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยมีค่า TEF สูงสุดเท่ากับ 2.33 ที่  $BR = 0.075$ ,  $PR = 1.00$  ที่  $Re = 1,000$  ของแผ่นกั้นรูปคลื่นมุมปะทะ  $30^\circ$



รูปที่ 2.2 โครงสร้างช่องขนาน และโดเมนการคำนวณเชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sripattanapipat and Promvong [11] แสดงการวิเคราะห์เชิงตัวเลขการถ่ายเทความร้อนราบเรียบ 2 มิติ ในช่องขนานที่ติดแผ่นกั้นรูปเพชรที่ผนังบน และล่างแนวเอียง โดยคิดลักษณะการไหลเป็นคาบ โดยใช้เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผนังคงที่ เลขเรย์โนลด์ในช่วง 100-600 พบว่าเมื่อลดมุมที่ยอดรูปเพชรจะทำให้ค่าเลขนัสเซิลท์ และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น และยังพบว่าทุกค่าเลขเรย์โนลด์ที่ใช่มุมยอดเพชรที่ 5° และ 10° ให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูงกว่ามุมยอดเพชรที่ 0° (แผ่นกั้นแบน)

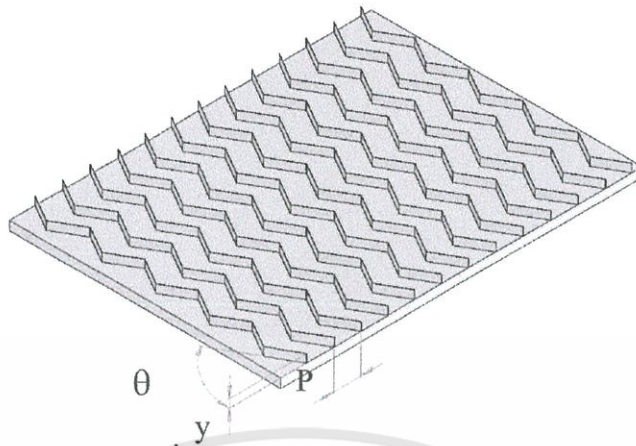
Choi et al. [12] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส และความร้อนที่ให้กับท่อสี่เหลี่ยมเป็นฟังก์ชันความร้อนคงที่ โดยติดครีบริบรูปตัววีมีทิศทางการไหล และครีบริบรูปตัววีมีทิศทางการไหลตรงข้ามกับการไหลที่ผิว ทำมุม 45° จากผลการทดลองพบว่า ครีบริบรูปตัววีมีทิศทางการไหลตรงข้ามกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบเสียดทานมากกว่าครีบริบรูปตัววีมีทิศทางการไหล

Zhang et al. [13] ทำการศึกษาอิทธิพลของร่องระหว่างครีบริบในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มี Aspect Ratio, AR = 1-10 ที่ค่าเลขเรย์โนลด์  $Re = 10,000-50,000$  และพบว่า ร่องระหว่างครีบริบให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าผนังครีบริบ แต่มีค่าความดันตกคร่อมเท่ากัน

Taslim et al. [14] รายงานค่าเลขนัสเซิลท์ที่จุดใด ๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบเนื่องจากมุมครีบริบ รูปทรงครีบริบตัววี และความไม่ต่อเนื่องครีบริบ (แนวครีบริบรูปตัววีมีทิศทางการไหล และมีทิศทางการไหลตรงข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วยฟังก์ชันความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่น ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อนพบว่า ค่าเลขนัสเซิลท์มากที่สุดเมื่อแนวครีบริบรูปตัววีมีทิศทางการไหลตรงข้ามกับการไหล

Gentry and Jacobi [15] การออกแบบปีกเพื่อให้เกิดการหมุนวนของของไหล ซึ่งเป็นการเพิ่มระดับการปั่นป่วน และการพาความร้อนดีขึ้นก่อให้เกิดการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่ดีขึ้น ได้นำเสนอการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยการเพิ่มการหมุนวนที่หัวมุมของแผ่นเรียบ โดยค่าเฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น 50-60% โดยที่ผิวของแผ่นเรียบจะใช้ปีกแบบ เดลต้า ซึ่งถือว่าดีกว่าปีกแบบสามเหลี่ยมหน้าจั่วเพราะเพิ่มอัตราส่วนการไหล และมุมปะทะ

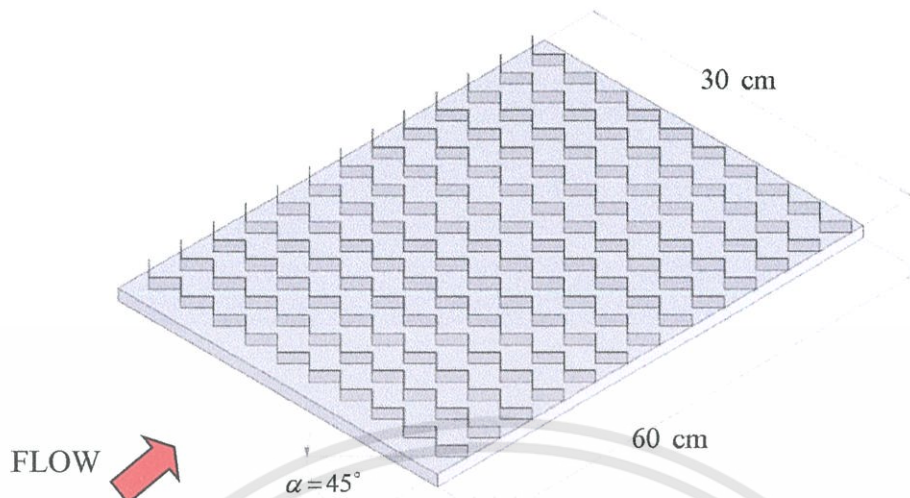
สกุลหลง [16] ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยช่องขนานที่มีครีบริบสามเหลี่ยม และครีบริบบางที่สภาวะการถ่ายเทความร้อนที่ผิวแบบคงที่ ทำการทดลองในช่วงเลขเรย์โนลด์  $Re = 5,000-25,000$  และทำการเปรียบเทียบผลของช่องขนานที่มีผนังเรียบ ช่องขนานที่มีครีบริบสามเหลี่ยมแบบต่าง ๆ ช่องขนานที่มีครีบริบบาง ทำมุม 60°, 45°, 30° และครีบริบตรง (90°) อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงช่องขนาน  $PR = 1, 2$  และ 3 อัตราส่วนความสูงครีบริบต่อความสูงช่องขนาน  $y/H = 0.1, 0.2$  และ 0.3 แผ่นทดสอบ แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผ่นทดสอบของ สกูลหลง

จากการทดลองพบว่าชุดทดลองที่มีครีบบางทำมุม  $60^\circ$  ให้ค่าการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับช่องขนานที่มีมุม  $45^\circ$ ,  $30^\circ$  และครีบตรง ( $90^\circ$ ) โดยที่ค่า  $PR = 1$  และ  $y/H = 0.3$  ให้ผลการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด โดยที่ครีบบาง  $60^\circ$  มีค่าเลขนัสเชิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 5.45 เท่า ตามด้วยครีบบาง  $45^\circ$  มีค่าเลขนัสเชิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 5.09 เท่า ครีบบาง  $30^\circ$  มีค่าเลขนัสเชิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 4.66 เท่า และครีบตรง ( $90^\circ$ ) มีค่าเลขนัสเชิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 2.04 เท่า แต่ค่าตัวประกอบเสียดทานก็มีมากด้วยเช่นกันโดยที่ครีบบาง  $60^\circ$  มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 24.53 เท่า ครีบบาง  $45^\circ$  มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 21.35 เท่า ครีบบาง  $30^\circ$  มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 13.21 เท่า และครีบตรง ( $90^\circ$ ) มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 10.94 เท่า ซึ่งส่งผลให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อนมีค่าดังนี้ โดยครีบบาง  $30^\circ$  มีค่าตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 1.97 ครีบบาง  $60^\circ$  มีค่าตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 1.90 มุม  $45^\circ$  มีค่าตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 1.87 และครีบตรง ( $90^\circ$ ) มีค่าตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 1.02 อย่างไรก็ตามการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่สูงสุดคือ มุม  $30^\circ$  ที่อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงช่องขนาน  $PR = 1$  และอัตราส่วนความสูงครีบต่อความสูงช่องขนาน  $y/H = 0.2$  โดยมีค่าตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 2.05

อำไพจิตร [17] ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อแผ่นขนานที่มีครีบบางรูปตัววีทำมุมปะทะกับของไหล  $45^\circ$  อัตราส่วนความสูงครีบต่อความสูงช่องขนาน  $y/H = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$  และ  $0.25$  อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงช่องขนาน  $PR = 1, 2$  และ  $3$  โดยติดตั้งครีบที่ผิวบนเพียงด้านเดียว และติดตั้งครีบที่ผิวบนและผิวล่าง จัดวางครีบบางเอียงกัน และตรงกัน โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวเป็นแบบฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ที่ท่อแผ่นขนานด้านบน และใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 ถึง 23,000 แผ่นทดสอบ



รูปที่ 2.4 ครีบทึบรูปตัววีมุม 45°

ผลการทดลองพบว่า การติดตั้งครีบทึบรูปตัววีที่ผิวบน และผิวล่างจัดวางครีบบนแบบตรงกัน ให้ค่าการถ่ายเทความร้อน และค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดท่อแผ่นขนานที่มีการติดตั้งครีบทึบที่ผิวบน และผิวล่างจัดวางครีบบนแบบเอียงกัน และติดตั้งครีบทึบที่ผิวบนเพียงอย่างเดียว โดยที่ค่า  $y/H = 0.25$  และ  $PR = 1$  มีค่าเลขนีสเชิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 10.63 เท่า และค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 68.67 เท่า ตามด้วย การติดตั้งครีบทึบที่ผิวบน และผิวล่างจัดวางครีบบนแบบเอียงกัน มีค่าเลขนีสเชิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 9.76 เท่า และค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 60.97 เท่า และการติดตั้งครีบทึบที่ผิวบนเพียงอย่างเดียว มีค่าเลขนีสเชิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 7.59 เท่า และค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 46.47 เท่า ซึ่งส่งผลให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบตามลำดับดังนี้ 2.61, 2.49 และ 2.12 เท่า อย่างไรก็ตามการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่สูงที่สุด คือ ชุดท่อแผ่นขนานที่ติดตั้งครีบทึบรูปตัววีโดยติดที่ผิวบน และผิวล่างแบบวางครีบบนตรงกัน ที่  $y/H = 0.10$ ,  $PR = 1$  มีการเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 2.91 เท่าที่กำลังขับดันของไหลเท่ากัน

### 2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย

จากการศึกษาพบว่าการใส่ตัวติดตั้งแบบที่แตกต่างกันนั้นทำให้เกิดผลกระทบของการพาความร้อนทั้งหมดโดยที่มีตัวแปรสำคัญ คือ ระยะห่างระหว่างตัวติดตั้ง พื้นที่ประทอบ หรือแม้กระทั่งลักษณะเฉพาะของแต่ละรูปทรง การที่ต้องการเปลี่ยนแปลงการพาความร้อนนั้น และยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอื่นอีกคือ ค่าการตัวประกอบเสียดทาน ดังนั้นเราควรคำนึงถึงทั้งสองตัวแปรสำคัญนี้เพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพรวมทั้งที่ขึ้นอีกด้วย

# บทที่ 3

## ทฤษฎี

### 3.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยพิจารณา และศึกษาการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเป็นการพาความร้อนแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อกลม (Forced convection for flow inside round tube) อธิบายกลศาสตร์การไหล สมดุลพลังงาน การถ่ายเทความร้อน สหสัมพันธ์ การพาความร้อน การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะมุ่งเน้นจะศึกษาวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน ความดันสูญเสีย และเพิ่มสมรรถนะความร้อน (Thermal performance enhancement factor: TEF) ซึ่งเป็นข้อมูลที่คำนวณที่กำลังขับเดียวกัน

### 3.2 กลศาสตร์ของไหล

การไหลภายในท่อ โดยที่ความหนาของชั้นขอบเขตการไหลไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ได้ เพราะว่าเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งชั้นขอบเขตการไหลก็ก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อจึงไม่สามารถขยายออกไปได้อีก เมื่อลักษณะของความเร็วจะมีลักษณะจะไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ซึ่งการไหลลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า การไหลที่ปรับตัวเต็มที่ (Fully developed flow) ส่วนการไหลก่อนหน้านี้นี้ เรียกว่า การไหลแบบกำลังขยาย (Developing flow) เรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region กำลังของพัลลัมจะเกี่ยวข้องกับความดันตกคร่อมดังนี้

การจ่ายกำลังให้พัลลัม,  $\dot{W}_{in}$

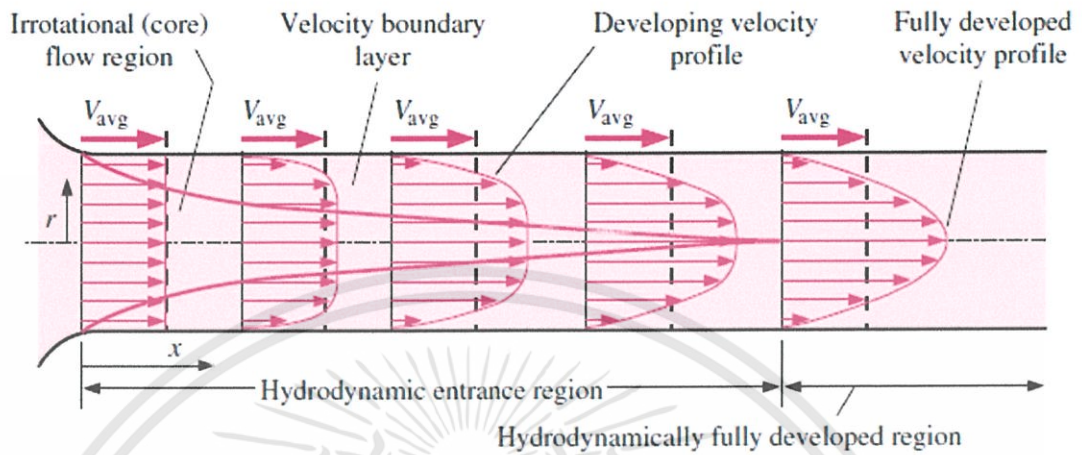
$$\dot{W}_{in} = \dot{V} \Delta P \quad (3.1)$$

ความดันตกคร่อมของของไหล,  $\Delta P$

$$\Delta P = f \frac{\rho L V^2}{2D} \quad (3.2)$$

### 3.2.1 สถานะการไหล

พิจารณาการไหลแบบราบเรียบในท่อกลมที่มีรัศมี  $r$  ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปแสดงการก่อตัวของขอบเขตการไหลของการไหลในท่อกลม [18]

ลักษณะการไหลภายในท่อนั้นเกี่ยวข้องกับความเร็วของช่วงบริเวณทางเข้า การไหลนั้นจะมี 2 รูปแบบคือการไหลแบบราบเรียบ และแบบปั่นป่วน เลขเรย์โนลด์ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงความเร็วและคุณสมบัติเฉพาะของของไหลภายในท่อกลมกำหนดเป็น

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ  
 $\mu$  คือ ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล  
 $u_m$  คือ ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ

เลขเรย์โนลด์วิกฤติ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เริ่มต้นที่  $Re_{D,c} \approx 2300$  และการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ที่  $Re_D \geq 4000$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ  $Re_D \leq 2300$  ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัว หาได้จากสมการ

$$\left(\frac{x_{fd,h}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05 Re_D \quad (3.4)$$

ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วน  $Re_D \geq 4000$  ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับเลขเรย์โนลด์ และมีค่าประมาณดังนี้

$$10 \leq \left(\frac{x_{fd,h}}{D}\right)_{turb} \leq 60 \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

### 3.2.2 ความเร็วเฉลี่ย

ความเร็วภายในท่อจะแปรเปลี่ยนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังนั้นจึงใช้ความเร็วเฉลี่ย  $u_m$  แทน โดยนิยามว่า อัตราการไหลของมวล คือ ความเร็วเฉลี่ยคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อ และความหนาแน่นของของไหล

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \quad (3.6)$$

ถ้าเป็นการไหลสถานะคงที่ ที่อัดตัวไม่ได้ภายในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ค่า  $\dot{m}$  และ  $u_m$  ย่อมมีค่าคงที่ตลอดความยาวท่อ

สำหรับท่อกลม  $A_c = \frac{\pi D^2}{4}$  แทนค่า  $u_m$  ของสมการ 3.6 ค่าของเลขเรย์โนลด์จะได้อ้างอิงดังนี้

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (3.7)$$

ค่า  $\dot{m}$  หาได้จากการอินทิเกรตของฟลักซ์มวลทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c \quad (3.8)$$

ดังนั้น สำหรับท่อกลม กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ จะได้

$$u_m = \frac{\int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c}{\rho A_c} = \frac{2\pi \rho}{\rho \pi r_0^2} \int_0^{r_0} u(r, x) r dr = \frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} u(r, x) r dr \quad (3.9)$$

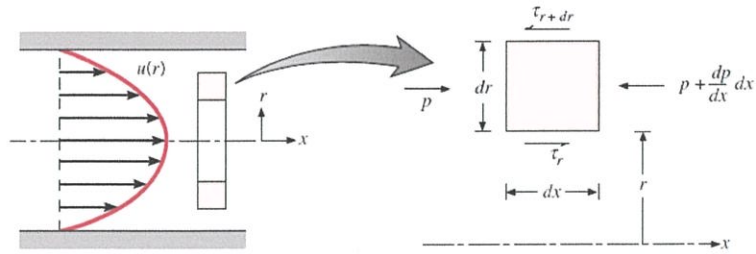
ซึ่งจะหาค่า  $u_m$  ได้ทันที เมื่อรู้ velocity profile,  $u(r)$  ที่ตำแหน่งนั้น

### 3.2.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็ม

รูปทรงของความเร็วสามารถหาได้ สำหรับการไหลแบบราบเรียบของของไหลที่คุณสมบัติคงที่ แบบอัดตัวไม่ได้ ในช่วงที่ปรับตัวเต็มที่ของท่อกลม โดยทั่วไปจะเป็นฟังก์ชันของรัศมีสำหรับการไหลปั่นป่วน ส่วนใหญ่ต้องอาศัยผลจากการทดลองเป็นหลัก)

เงื่อนไขข้างต้น คือ ค่าความเร็วในแนวรัศมี และการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกนทุก ๆ แห่งมีค่าเป็นศูนย์  $v=0$  และ  $(\partial u / \partial x) = 0$  ดังนั้นความเร็วตามแนวแกนจะมีค่าขึ้นอยู่กับ  $r$  เท่านั้น  $[u(x, r) = u(r)]$

ความเร็วตามแนวแกนหาได้จากการแก้สมการที่เหมาะสมของสมการโมเมนตัมตามแนว  $x$  หรือหาโดยคิดสมดุลของการอนุรักษ์โมเมนตัมก็ได้ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สมดุลแรงบนอิลิเมนต์ดิฟเฟอเรนเชียล สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ก่อตัวเต็มทีในท่อกลม

สำหรับอิลิเมนต์ดิฟเฟอเรนเชียลรูปวงแหวนแสดงในรูปที่ 3.2 สามารถเขียนสมดุลของแรงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 & -\tau_r(2\pi r dx) + \left\{ \tau_r(2\pi r dx) + \frac{d}{dr} [\tau_r(2\pi r dx)] dr \right\} \\
 & + p(2\pi r dr) - \left\{ p(2\pi r dr) + \frac{d}{dx} [p(2\pi r dr)] dx \right\} = 0
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

ซึ่งลดรูปเป็น 
$$-\frac{d}{dr}(r\tau_r) = r \frac{dp}{dx} \tag{3.11}$$

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

ดังนั้น 3.11 จะเป็น 
$$\frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} \tag{3.12}$$

เพราะว่า  $\frac{dp}{dx}$  นั้นไม่ขึ้นกับ  $r$  ดังนั้นเราสามารถอินทิเกรต 3.12 ได้

$$r \frac{du}{dr} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{dp}{dx} \right) \frac{r^2}{2} + C_1 \tag{3.13}$$

และ 
$$u(r) = \frac{1}{\mu} \left( \frac{dp}{dx} \right) \frac{r^2}{4} + C_1 \ln r + C_2 \tag{3.14}$$

จากเงื่อนไขที่ขอบ ได้ว่า  $u(r_0) = 0$  และ  $\partial u / \partial r|_{r=r_0} = 0$  จะได้

$$u(r) = -\frac{1}{4\mu} \left( \frac{dp}{dx} \right) r_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \tag{3.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นรูปทรงของความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่ จะเป็นพาราโบลา และสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน  $\frac{dp}{dx}$  ต้องเป็นลบเสมอ ผลลัพธ์ที่กล่าวมานี้อาจใช้หาค่าความเร็วเฉลี่ยได้ ( $u_m$ ) โดยแทนสมการ 3.15 ใน 3.9 แล้ว อินทิเกรต จะได้

$$u_m = -\frac{r_o^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} \quad (3.16)$$

แทนสมการ 3.16 ใน 3.15 จะได้รูปร่างของความเร็วเป็น

$$\frac{u(r)}{u_m} = 2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_o} \right)^2 \right] \quad (3.17)$$

เพราะว่า  $u_m$  สามารถหาได้จากการรู้อัตราการไหลของมวล ดังนั้นสมการ 3.16 สามารถใช้หาเกรเดียนต์ของความดันได้  $\frac{dp}{dx}$

3.2.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่ ในงานด้านวิศวกรรมทั่วไป จะให้สนใจเกี่ยวกับการเกิดความดันตกคร่อมในการไหลภายในท่อ เนื่องจากตัวพารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับการหาขนาดกำลังงานของปั๊มหรือพัดลมโดยตรง ในการหาความดันตกคร่อม หาได้โดยใช้ตัวประกอบเสียดทานของ Moody chart ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยนิยามว่า

$$f = \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2/2} \quad (3.18)$$

ค่านี้ต่างกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน  $C_f$  ซึ่งบางครั้ง เรียกว่า ตัวประกอบเสียดทานแผ่นนิ่ง ซึ่งนิยามว่า

$$C_f = \frac{\tau_s}{\rho u_m^2/2} \quad (3.19)$$

เพราะว่าแรงเฉือนบนผิวของของไหลเท่ากับทิศทางตรงกันข้ามแรงบนผิวของของไหล ดังนั้น ความเค้นเฉือนบนผิวกำหนดเป็น  $\tau_s = -\mu(du/dr)|_{r=r_o}$  ได้

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (3.20)$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่

$$f = \frac{64}{\text{Re}_D} \quad (3.21)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่ การวิเคราะห์ยุ่งยากมากกว่าต้องใช้ผลจากการทดลองตัวประกอบเสียดทานสำหรับค่าเลขเรย์โนลด์ต่าง ๆ ได้แสดงในไดอะแกรมของ Moody chart ในรูปที่ 3.2 ตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ และสภาวะผิวของท่อ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับผิวเรียบ และเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหยาบของผิวเพิ่มขึ้นโดยประมาณดังนี้

$$f = 0.316\text{Re}_D^{-1/4} \quad \text{Re}_D < 2 \times 10^4 \quad (3.22)$$

$$f = 0.184\text{Re}_D^{-1/5} \quad \text{Re}_D > 2 \times 10^4 \quad (3.23)$$

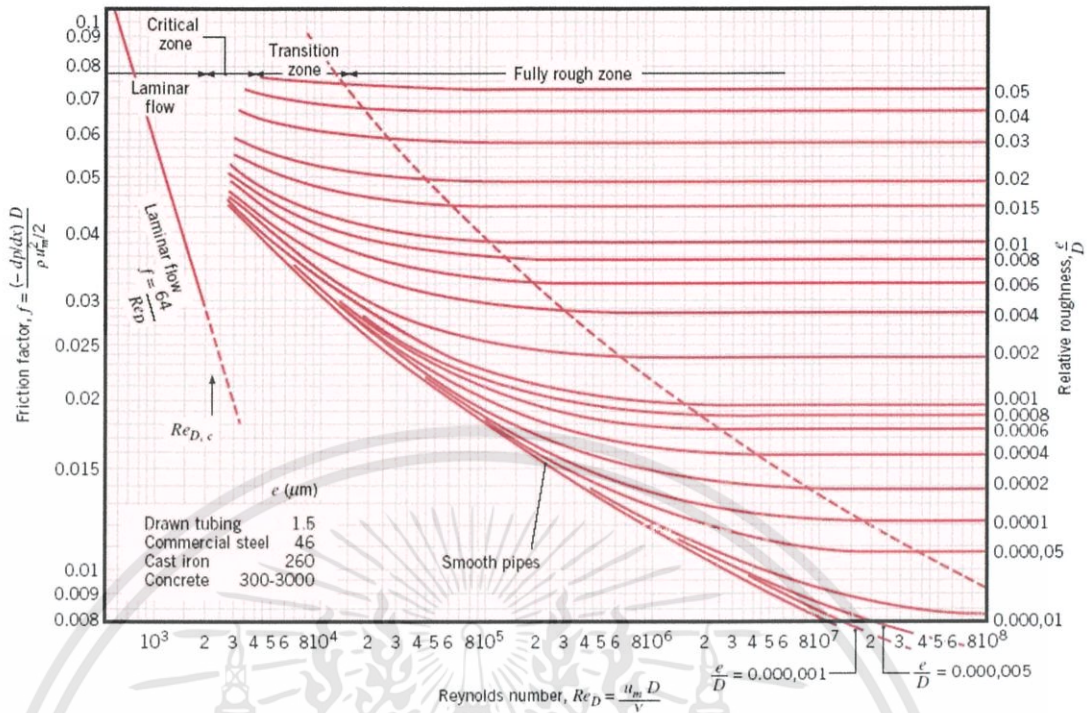
นอกจากนี้เรารู้ว่าความดันตกคร่อม ( $\Delta p$ ) ระหว่างระยะ  $x_1$  ถึง  $x_2$  เป็น

$$\Delta p = -\int_{p_1}^{p_2} dp = f \frac{\rho u_m^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx = f \frac{\rho u_m^2}{2D} (x_2 - x_1) \quad (3.24)$$

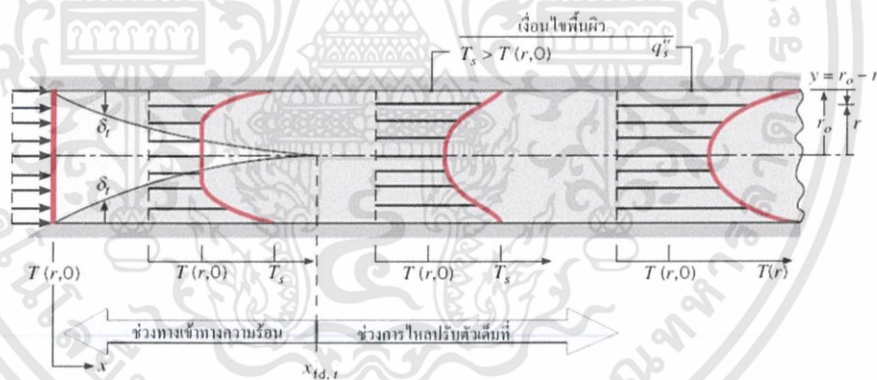
ซึ่งค่า  $f$  หาจากรูปที่ 3.3 หรือจากสมการ 3.21 สำหรับการไหลแบบราบเรียบ และจากสมการ 3.22 และ 3.23 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมผิวเรียบ

### 3.3 การถ่ายเทความร้อน

การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม แสดงในรูปที่ 3.4 ที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ  $T(r,0)$  ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิว การพาความร้อนจะเกิดขึ้น และชั้นขอบเขตการไหลของความร้อนจะเริ่มต้นก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่ โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอคงที่ ( $T_s =$  คงที่) หรือ ฟลักซ์ (flux) ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ ( $q_s'' =$  คงที่) สภาวะที่ปรับตัวคงที่ของความร้อน (Thermally fully developed condition) ก็เกิดขึ้น ในที่สุดรูปร่างของอุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่ซึ่งแตกต่างกันตามเงื่อนไขไม่ว่าอุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่



รูปที่ 3.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มทีในท่อกลม [18]



รูปที่ 3.4 การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม [18]

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัว

$$\left( \frac{x_{fd,t}}{D} \right)_{\text{lam}} \approx 0.05 \text{Re}_D \text{Pr} \tag{3.25}$$

โดยการเปรียบเทียบบริเวณทางเข้า ของอุณหภูมิตามสมการ 3.25 กับสมการของความเร็ว 3.4 จะพบว่าต่างกันที่ค่า Pr เท่านั้น จึงพอสรุปได้ว่า ถ้า  $\text{Pr} > 1$  ไฮโดรไดนามิกส์ชั้นขอบเขตการไหลขยายเร็วกว่าชั้นขอบเขตการไหลของความร้อนมาก ( $x_{fd} > x_{fd,t}$ ) และจะกลับกันถ้า  $\text{Pr} < 1$  สำหรับค่า Pr สูง ๆ เช่น น้ำมัน ( $\text{Pr} \geq 100$ )  $x_{fd}$  จะน้อยกว่า  $x_{fd,t}$  มาก และอาจสมมุติได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปทรงของความเร็วที่ปรับตัวเต็มที่ มีตลอดช่วงบริเวณทางเข้าของความร้อน ในทางกลับกันของไหลที่มีค่า Pr ต่ำมาก ๆ เช่น โลหะเหลว ( $Pr \leq 0.05$ ) รูปร่างอุณหภูมิอาจเป็นแบบปรับตัวเต็มที่ได้เร็วมาก ในขณะที่รูปร่างของความเร็วยังอยู่ในช่วงกำลังก่อตัวอยู่ ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วนเงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ Pr และโดยการประมาณได้ว่า  $\frac{x_{fd}}{D} = 10$

### 3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย

ในเรื่องอุณหภูมิ จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_m$ ) โดยให้ความหมายได้ดังสมการนี้

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho u c_v T dA_c}{\dot{m} c_v} \quad (3.26)$$

สำหรับท่อกลม และเป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้

$$T_m = \frac{2}{u_m r_o^2} \int_0^{r_o} u T r dr \quad (3.27)$$

ค่าของ  $T_m$  จะเปลี่ยนตามแนว  $x$  ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหล ซึ่งต่างจาก  $u_m$  มีค่าคงที่ สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ พลั๊กซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใด ๆ หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.28)$$

ซึ่ง  $h$  เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใด ๆ  $T_m$  เปลี่ยนแปลงตามทิศทาง นั่นคือ  $\frac{dT_m}{dx}$  จะไม่เป็นศูนย์ ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น

### 3.3.2 สถานะการปรับตัวเต็มที่

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิว และของไหล นั่นคืออุณหภูมิของไหลยังคงเปลี่ยนแปลงตามระยะ  $x$  สิ่งหนึ่งที่ยากรู้คือเกิดภาวะ Thermal fully developed หรือไม่ สถานการณ์นี้จะแตกต่างไปจากกรณีการไหลของของไหลที่  $(\partial u/\partial x) = 0$  ในช่วงบริเวณปรับตัวเต็มที่ ในทางกลับกัน ถ้ามีการพาความร้อน ( $dT_m/dx$ ) เช่นเดียวกับ  $(\partial T/\partial x)$  ที่รัศมี  $r$  ใด ๆ จะไม่เป็นศูนย์ ผลที่ตามมา คือ รูปร่างของอุณหภูมิ  $T(r)$  จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ  $x$  ซึ่งเปรียบเสมือนว่า สถานะการปรับตัวเต็มที่ของอุณหภูมิไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิเพื่อให้ได้เงื่อนไข

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

สัมพัทธ์ของ profile นี้จะไม่เปลี่ยนแปลงเลย และการไหลแบบนี้เรียกว่า การไหลปรับตัวเต็มที่ทางความร้อน และจะได้ว่า

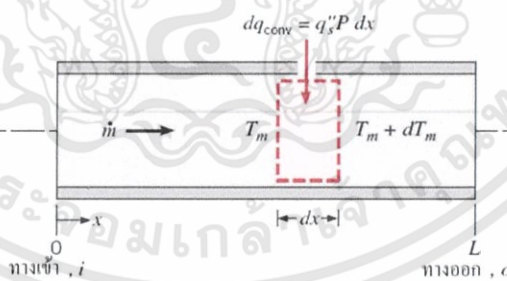
$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right]_{fd,t} = 0 \quad (3.29)$$

เมื่อ  $T_s$  คือ อุณหภูมิผิวท่อ  
 $T$  คือ อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใด ๆ  
 $T_m$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ 3.29 ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่อ อาจจะเป็นกรณี  $q_s''$  คงที่ หรือ  $T_s$  คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ในผนังท่อที่ได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอ จะเป็นกรณีของ  $q_s''$  คงที่ ส่วนกรณี  $T_s$  คงที่ จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสถานะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

### 3.4 การสมดุลของพลังงาน

พิจารณาการไหลในท่อตามรูปที่ 3.5 ของไหลไหลด้วยอัตรามวลคงที่  $\dot{m}$  และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ของของไหลรวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางตามแนวแกนจะไม่นำมาคิด ดังนั้นถ้าไม่มีงานเพลาสังเคราะห์โดยของไหลขณะไหลผ่านท่อ จะมีเพียงอิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน และงานจากการไหลเท่านั้น



รูปที่ 3.5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ [18]

งานของการไหลเป็นงานที่ใช้เคลื่อนของไหลผ่านปริมาตรควบคุม คิดต่อหน่วยมวลของไหล และจะอยู่ในรูปของผลคูณของความดัน  $p$  และปริมาตรจำเพาะ  $v$

โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 3.5 และจากนิยามของ  $T_m$  จะได้

$$dq_{conv} + \dot{m}(c_v T_m + pv) - \left[ \dot{m}(c_v T_m + pv) + \dot{m} \frac{d(c_v T_m + pv)}{dx} dx \right] = 0 \quad (3.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ 
$$dq_{\text{conv}} = \dot{m}d(c_v T_m + pv) \quad (3.31)$$

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

$$dq_{\text{conv}} = \dot{m}c_p dT_m \quad (3.32)$$

สมการนี้ใช้ได้สำหรับของเหลวที่อัดตัวไม่ได้เช่นกัน ในกรณีนี้  $c_v = c_p$  เพราะ  $v$  น้อยมาก ๆ  $d(pv)$  โดยทั่วไปจะน้อยกว่า  $d(c_v T_m)$  มากจนตัดทิ้งได้

รูปของสมการ 3.32 เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขสำหรับท่อทั้งหมด โดยการอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อ จะได้

$$q_{\text{conv}} = \dot{m}c_p (T_{m,o} - T_{m,i}) \quad (3.33)$$

โดยที่  $q_{\text{conv}}$  เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน,  $h$

$$h = \frac{\dot{m}c_p (T_{m,o} - T_{m,i})}{A_s (T_s - T_b)} \quad (3.34)$$

อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล,  $T_b$

$$T_b = \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \quad (3.35)$$

เลขนัสเซลต์,  $Nu_D$

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \quad (3.36)$$

เงื่อนไขความร้อนที่ผิว คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่

### 3.5 สหสัมพันธ์การพาความร้อนและการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม

สมการพลังงานของช่วงบริเวณที่ปรับตัวเต็มที่ ณ ตำแหน่งจุดใด ๆ ในท่อ

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.37)$$

พจน์ทางซ้ายมือของสมการ 3.37 เป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการพา และพจน์ทางขวามือเป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการนำ ในทิศทางตามแนวรัศมี

คำตอบของสมการ 3.37 ได้หาไว้แล้วสำหรับช่วงที่ปรับตัวเต็มที่ ในช่วงนี้การประมาณชั้นขอบเขตการไหลของความเร็วเป็นที่พอใจ นั่นคือ  $v=0$  และ  $(\partial u/\partial x)=0$  สำหรับกรณีของรูปร่างความเร็วตามแนวแกนเป็นแบบพาราโบลา นอกจากนี้สำหรับกรณี ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ การประมาณชั้นขอบเขตการไหลของอุณหภูมิให้ผลที่เป็นที่พอใจเช่นกัน นั่นคือ  $\partial^2 T/\partial x^2 = 0$  แทนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามแนวแกนและความเร็วตามแนวแกน สมการพลังงาน 3.37 ลดรูปเป็น

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rdT) = \frac{2u_m}{\alpha} \frac{dT_m}{dx} \left[ 1 - (r/r_0)^2 \right] \quad q_s'' = \text{คงที่} \quad (3.38)$$

ซึ่งพจน์  $(2u_m/\alpha)(dT_m/dx)$  คงที่ โดยการแยกตัวแปร และอินทิเกรต 2 ครั้ง จะได้

$$T(r) = \frac{2u_m}{\alpha} \left( \frac{dT_m}{dx} \right) \left[ \frac{r^2}{4} - \frac{r^4}{16r_0^2} \right] + C_1 \ln r + C_2 \quad (3.39)$$

ค่าคงที่ของการอินทิเกรต  $C_1$  และ  $C_2$  หาจากเงื่อนไขที่ขอบดังนี้  
 $T$  ที่  $r=0$  หรือ  $(\partial T/\partial r = 0$  ที่  $r=0)$  จะได้  $C_1 = 0$  และ  $T(r_0) = T_s$  ที่ซึ่ง  $T_s$  แปรตาม  $x$  จะได้  $C_2 = T_s - (2u_m/\alpha)(dT_m/dx)(3r_0^2/16)$  ดังนั้นสำหรับช่วงที่ปรับตัวเต็มที่ ฟลักซ์ความร้อน(heat flux) ที่ผิวคงที่ที่จะได้การกระจายของอุณหภูมิในรูป

$$T(r) = T_s - \frac{2u_m r_0^2}{\alpha} \left( \frac{dT_m}{dx} \right) \left[ \frac{3}{16} + \frac{1}{16} \left( \frac{r}{r_0} \right)^4 - \frac{1}{4} \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (3.40)$$

เมื่อรู้การกระจายของอุณหภูมิ ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ก็สามารถหาได้ เช่น ถ้ารูปร่างของความเร็ว และอุณหภูมิตามสมการ 3.15 และ 3.40 โดยแทนในสมการ 3.27 และอินทิเกรตทั่วทั้ง  $r$  จะได้

$$T_m = T_s - \frac{11}{48} \left( \frac{u_m r_0^2}{\alpha} \right) \left( \frac{dT_m}{dx} \right) \quad (3.41)$$

จากสมการ 
$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p}$$

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

$$T_m - T_s = -\frac{11}{48} \frac{q_s'' D}{k} \quad (3.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน สมการ 3.28 และ 3.42 ได้ว่า

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

$$\text{Nu}_D = \frac{hD}{k} = 4.36 \quad (3.43)$$

สำหรับ  $q_s''$  คงที่

ดังนั้นในท่อกลมที่มีคุณลักษณะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ การไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที ค่าเลขนัสเซิลท์จะคงที่ไม่ขึ้นกับ  $\text{Re}_D$ ,  $\text{Pr}$  และตำแหน่งตามแนวแกน  $x$

### 3.6 สหสัมพันธ์การพาความร้อนและการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม

สมการหา  $\text{Nu}_x$  สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มทีในท่อกลมเรียบ ใช้สมการของ Colburn ซึ่งได้มาจาก Chilton-Colburn analogy [18]

$$\frac{C_f}{2} = \frac{f}{8} = \text{StPr}^{2/3} = \frac{\text{Nu}_D}{\text{Re}_D \text{Pr}} \quad (3.44)$$

แทน  $f$  จากสมการ 3.23 สมการของ Colburn เป็น

$$\text{Nu}_D = 0.023 \text{Re}_D^{4/5} \text{Pr}^{1/3} \quad (3.45)$$

Dittus-Boelter [18] ได้เสนอสมการเป็น

$$\text{Nu}_D = 0.023 \text{Re}_D^{4/5} \text{Pr}^n \quad (3.46)$$

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

และ  $n=0.3$  สำหรับการทำให้เย็น ( $T_w < T_m$ )

สมการนี้ได้รับการยืนยันจากผลการทดลองสำหรับช่วงของเงื่อนไขดังนี้

$$\left[ \begin{array}{l} 6,000 \leq \text{Re}_D \leq 10^7 \\ 0.5 \leq \text{Pr} \leq 120 \\ L/D \geq 60 \end{array} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการต่าง ๆ นี้จะใช้เพียงเฉพาะกรณี ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ ( $T_s - T_m$ ) ไม่มากนัก โดยคุณสมบัติต่าง ๆ คิดที่  $T_m$  สำหรับการไหลที่แสดงลักษณะการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติมาก ๆ Seider และ Tate [18] ได้แนะนำให้ใช้สมการต่อไปนี้

$$Nu_D = 0.027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (3.47)$$

สำหรับ

$$\left[ \begin{array}{l} 6,000 \leq Re_D \leq 10^7 \\ 0.7 \leq Pr \leq 10,000 \\ L/D \geq 60 \end{array} \right]$$

โดยที่คุณสมบัติต่าง ๆ ยกเว้นค่า  $\mu_s$  หาที่  $T_m$  โดยที่  $\mu_s$  หาที่  $T_w$

### 3.7 การเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

เนื่องจากการทดลองจำเป็นต้องเปรียบเทียบกรณีศึกษาต่างที่ทดลองกับการทดลองท่อของเปล้าเสมอ เพื่อดูว่าค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของกรณีไหนมีสมรรถนะมากที่สุด ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าค่าพารามิเตอร์ตัวไหนมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด

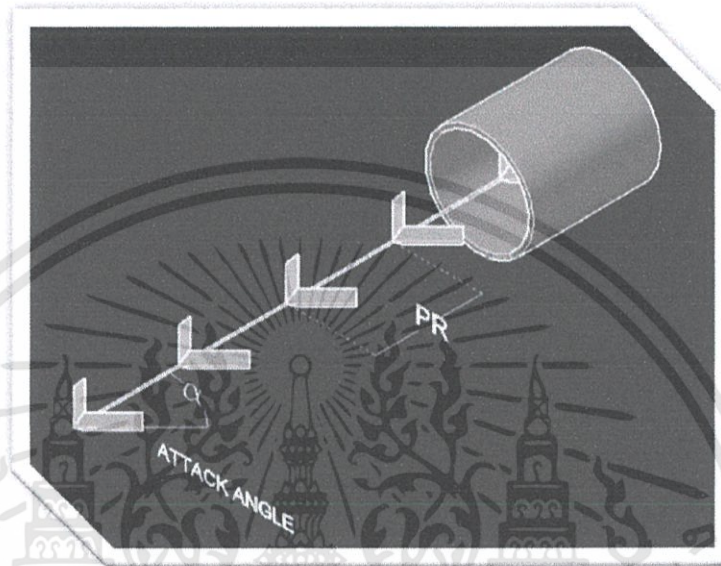
ซึ่งสมการการเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$TEF = \frac{h_s}{h_p} \bigg|_{pp} = \frac{Nu_s}{Nu_p} \bigg|_{pp} = \left( \frac{Nu_s}{Nu_p} \right) \left( \frac{f_s}{f_p} \right)^{-1/3}$$

- โดยที่
- $h_s$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อที่ใส่แผ่นกัน
  - $h_p$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อเปล้า
  - $Nu_s$  คือค่าเลขนีสเซลท์ของท่อที่ใส่แผ่นกัน
  - $Nu_p$  คือค่าเลขนีสเซลท์ของท่อเปล้า
  - $f_s$  คือตัวประกอบเสียดทานของท่อที่ใส่แผ่นกัน
  - $f_p$  คือตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล้า

### 3.8 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยการทำให้เกิดการหมุนวนด้วยการติดตั้งครีบอกตัววีตามรูปที่ 3.6 การสอดแทรกนี้ประกอบด้วยแผ่นปีกบาง เป็นผลให้ความเร็วของการไหลเพิ่ม เนื่องจากความเร็วสัมผัสเพิ่มใกล้เคียงท่อ การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นผลให้เกิดความดันตกคร่อม (Pressure drop) มากขึ้น



รูปที่ 3.6 ต้นแบบการถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งครีบอกตัววีในท่อกลม

## บทที่ 4

# การออกแบบอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึง การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมที่มีการติดตั้งชิ้นงานรายละเอียดของอุปกรณ์ติดตั้ง บอกถึงรายละเอียดในส่วนเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยแบ่งส่วนในกรณีศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมโดยศึกษาพารามิเตอร์ ของโมเดลที่ศึกษาโดยแบ่งเป็น 4 ส่วนหลัก ดังนี้

1. มุมปะทะของชิ้นงาน
2. มุมระหว่างชิ้นงานส่วนบนกับชิ้นงานส่วนล่าง
3. ระยะพิตช์
4. อัตราส่วนความสูงของชิ้น

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้น บทนี้ได้กล่าวถึงสมการในการวิเคราะห์ข้อมูลการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม ประกอบด้วย การถ่ายเทความร้อนในพจน์ของเลขนัสเซิลท์ และความต่างของความดันในพจน์ของค่าตัวประกอบเสียดทาน ท้ายที่สุดคือการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และผลต่างความดันภายในท่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่า และการเพิ่มสมรรถนะความร้อน ซึ่งเป็นข้อมูลที่คำนวณที่กำลังขับเดียวกัน

### 4.2 การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลอง

#### 4.2.1 เครื่องอัดอากาศ

พิจารณาขนาดพัดลม โดยที่เลขเรย์โนลด์สูงสุด  $Re = 24,000$  ซึ่งเป็นช่วงที่กำลังของเครื่องอัดอากาศสามารถให้ได้สูงสุด

จากตารางคุณสมบัติอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ  $318\text{ K}$  จะได้  $\rho = 1.099712\text{ kg/m}^3$  และ  $\mu = 191.3993 \times 10^{-7}\text{ N}\cdot\text{s/m}^2$

จากสมการเลขเรย์โนลด์

$$Re_D = \frac{\rho \bar{V} D_h}{\mu}$$

หาความเร็วเฉลี่ย

$$\begin{aligned}\bar{V} &= \frac{Re_D \mu}{\rho D_h} \\ &= \frac{24,000 \times 191.3993 \times 10^{-7}}{1.099712 \times 0.05} \\ &= 8.35\text{ m/s}\end{aligned}$$

จากสมการ

$$\begin{aligned}Q &= \bar{V} A_c \\ &= 8.35 \times \frac{\pi D^2}{4}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.0164 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 0.984 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

ดังนั้น ในการทดลองกำหนดให้ใช้พัดลม ที่สามารถให้ค่าอัตราการไหลมากกว่า 0.984 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

#### 4.2 ท่อทางเข้าชุดทดลอง

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ( $Re_D \leq 2,300$ ) ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัว หาได้จากสมการ

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

เลขเรย์โนลด์วิกฤติ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของการไหลจากแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน เริ่มต้นจาก  $Re_{D,c} \approx 2,300$  และการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ เมื่อ  $Re_D \geq 4,000$

ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วน ( $Re_D \geq 4,000$ ) ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับเลขเรย์โนลด์ และมีค่าประมาณดังนี้

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

สำหรับค่าที่ใช้ในที่นี้ เราจะสมมติว่า  $x_{fd} = 30D_h$  สำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad x_{fd} &= 30D_h \\ &= 30 \times 0.05 \\ &= 1.5 \text{ m} \end{aligned}$$

ดังนั้น ในการทดลองจึงกำหนดท่อทางเข้าชุดทดลองให้มีความยาว 1.8 เมตร

#### 4.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดลอง

เนื่องจากการศึกษาผลการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงาน ซึ่งมีพารามิเตอร์หลายค่า โดยค่าที่เป็นผลต่อท่อทดลองโดยตรงคือความสูงของชิ้นงาน และระยะพิตช์ ดังนั้นการจัดเตรียมชุดทดลองมีรายละเอียดต่าง ๆ ของชุดทดลอง และอุปกรณ์วัดดังนี้

#### 4.3.1 ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม

ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมด้วยโครงครีบโค้งรูปตัววี โดยติดตั้งอุปกรณ์ด้วยการใส่ ซึ่งชุดทดลองแสดงในรูป 4.1 โดยออกแบบอุปกรณ์การทดลองเปรียบเสมือนกับท่อผนังเรียบ และรูป 4.2 เป็นอุปกรณ์ติดตั้งในท่อกลม



รูปที่ 4.1 ชุดทดลองที่ใช้ทดลอง



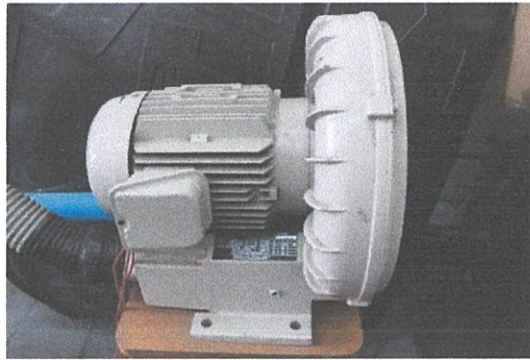
รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ติดตั้งที่ใช้ทดลอง

ชิ้นงานทดลองมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ท่อยาวทั้งหมดเท่ากับ 3 เมตร ซึ่งผนังของชุดทดลองจะประกอบไปด้วยฉนวน 3 ชั้น ฉนวนชั้นแรกใช้วัสดุเป็นฉนวนใยแก้ว ฉนวนชั้นที่สองเป็นฉนวนใยแก้ว และชั้นที่สามหุ้มด้วยฉนวนที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศ

#### 4.3.2 เครื่องอัดอากาศ

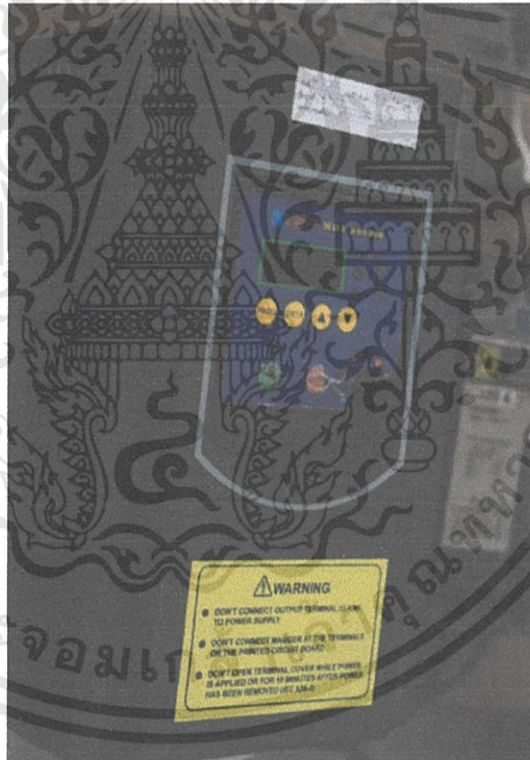
แหล่งจ่ายอากาศ ใช้พัดลม (High-pressure blower) HITACHI VB-020-DN เป็นแบบพัดลมหอยโข่งแรงดันสูง ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ หรือ 2 HP ความดัน 5.9 kPa แสดงในรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 พัดลมแรงดันสูง

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) Omron Inverter, 3G3JX-A4037, 380-480V 3PHASE 3.7 kw 5 HP เป็นอินเวอร์เตอร์แบบปรับความถี่ (Frequency Inverter) ถูกนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับพัดลม ในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตามที่กำหนด แสดงในรูป 4.4



รูปที่ 4.4 อินเวอร์เตอร์

#### 4.3.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

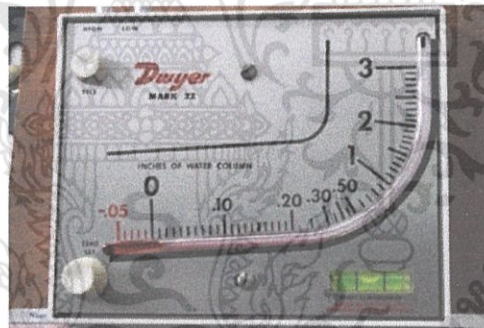
Orifice meter เป็นอุปกรณ์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศ ติดตั้งที่ทางเข้าชุดทดลองระหว่างพัดลม และถังพักลม ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ในการสร้างอุปกรณ์ Orifice meter ได้สร้างตามมาตรฐานของ JIS (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD) Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes JIS Z 8762 ทำจากแผ่นเหล็ก ความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนา 5 มิลลิเมตร โดยออร์ฟิฟิสออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านหน้า 47 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านหลัง 51 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.5 และรายละเอียดเพิ่มเติมของออร์ฟิฟิส แสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 4.5 Orifice meter

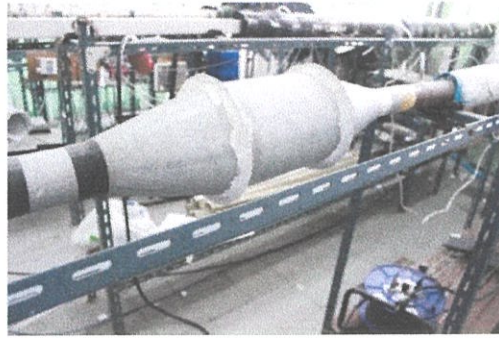
เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer) รุ่น Mark III Model No.25 ใช้วัดความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลัง Orifice meter เพื่อใช้หาอัตราการไหลของอากาศ ความแตกต่างของความดัน ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากความแตกต่างของระดับ red gage oil (specific gravity = 0.826)



รูปที่ 4.6 เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง

#### 4.3.4 ถังพักลม

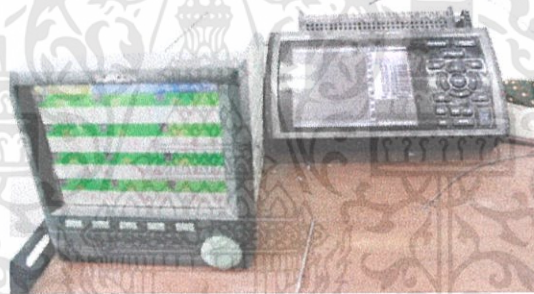
ถังพักลม (Settling tank) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับสภาพการไหลของอากาศ เพื่อให้จัดเรียง และปรับสภาพการไหลอากาศ ให้เกิดการปั่นป่วนน้อยสุดก่อนเข้าสู่ท่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ท่อยาวทั้งหมดเท่ากับ 3 เมตร แสดงในรูปที่ 4.7



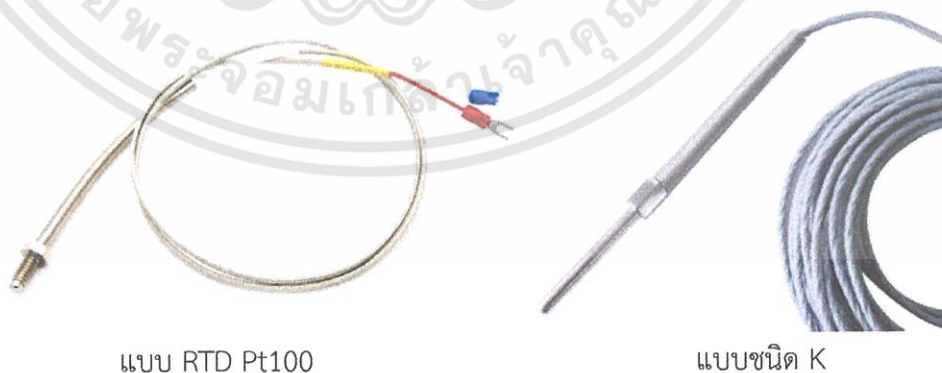
รูปที่ 4.7 ถังพักลม

#### 4.3.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

R3000 series Color Paperless Recorder, SUPCON เป็นที่เก็บข้อมูล (Recorder) และแสดงผลอุณหภูมิ สามารถแสดงค่าอุณหภูมิได้ทั้งหมด 12 ค่า การใช้งานโดยเชื่อมต่อเครื่องเข้ากับเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ทั้งหมด 26 ตัว เพื่อแสดงผล และเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิว 24 ตำแหน่ง อุณหภูมิทางเข้า และทางออกส่วนทดสอบ 2 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 เครื่องเก็บข้อมูล



แบบ RTD Pt100

แบบชนิด K

รูปที่ 4.9 เทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมคัปเปิล เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิผิวท่อ อุณหภูมิที่ทางเข้าช่วงทดลอง และอุณหภูมิที่ทางออกช่วงทดลอง แสดงในรูปแบบที่ 4.9 โดยเทอร์โมคัปเปิลแบบชนิด K จำนวน 24 ตัวเพื่อวัดอุณหภูมิผิวทั้งหมด 24 ตำแหน่ง และเทอร์โมคัปเปิลแบบ RTD Pt100 จำนวน 2 ตัว เพื่อวัดอุณหภูมิทางเข้า และอุณหภูมิทางออก

#### 4.3.6 เครื่องวัดความดันตกคร่อม

เครื่องวัดความดันตกคร่อม (Digital Manometer) รุ่น Dwyer 475 Mark III ช่วงการใช้งาน 0-10.00 IN W.C. (0-2.49 kPa) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันตกคร่อมระหว่างส่วนทดสอบ



รูปที่ 4.10 เครื่องวัดความดันตกคร่อม

#### 4.3.7 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ

เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (Vane-type Anemometer) รุ่น AM-4207SD ยี่ห้อ LUTRON เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วลมที่ตำแหน่งทางออกของชุดออริฟิส ใช้ในการสอบเทียบความเร็วลมในการทดลอง



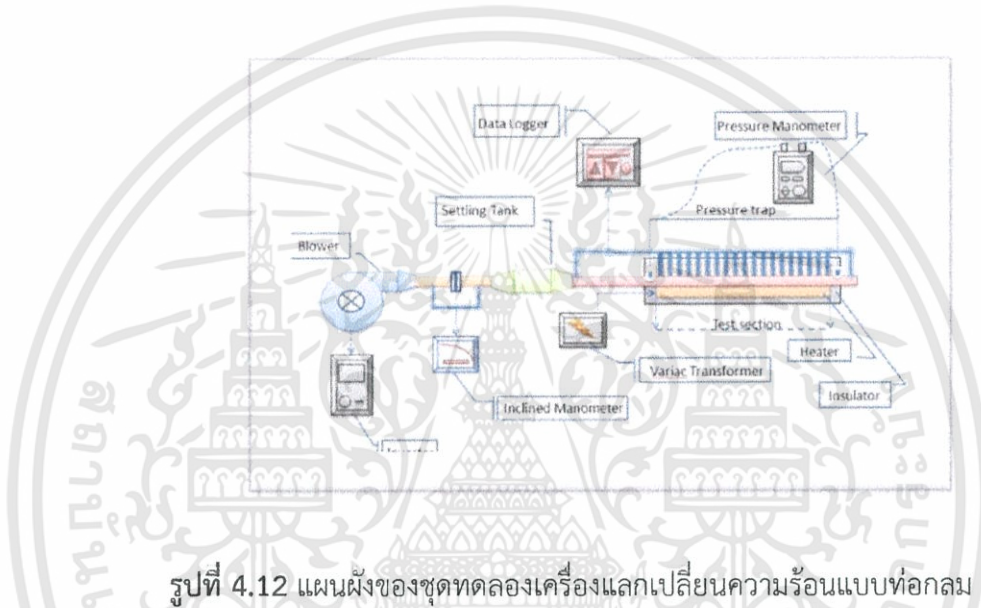
รูปที่ 4.11 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

### 4.4.1 อุปกรณ์ชุดทดลอง

ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมที่มีการติดตั้งปีกบาง และอุปกรณ์การทดลองต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.12 อากาศ เป็นของไหลทดสอบในส่วนของ การถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดัน ถูกส่งตรงเข้าสู่ระบบโดยพัดลมความดันสูง ขนาด 1.5 kW โดยท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7 มิลลิเมตร ใช้เชื่อมต่อระหว่างพัดลมกับถังพักลม โดยมีอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็วรอบการทำงานของพัดลมเพื่อให้ได้อัตราการไหลของอากาศตามที่ออกแบบไว้ อัตราการไหลของอากาศในระบบถูกวัดโดยใช้แผ่นออร์ฟิสถูกสอบเทียบค่ามาก่อนโดยใช้ Hot wire และ Vane-type Anemometers ความดันตกคร่อมออร์ฟิส วัดโดยใช้ Inclined manometer



รูปที่ 4.12 แผนผังของชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม

โครงสร้างของท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ซึ่งปีกบางถูกสร้างจากแผ่นอะลูมิเนียม การวัดอุณหภูมิผิวส่วนทดสอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 24 ตัวถูกติดตั้งที่ผนังด้านบน และด้านข้างของช่วงท่อทดสอบอย่างละ 12 ตัว และเทอร์โมคัปเปิลอีกจำนวน 2 ตัวใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศขาเข้า และขาออกจากช่วงท่อทดสอบ โดยค่าอุณหภูมิทั้งหมดจะแสดงผลผ่านเครื่อง Data Logger ผนังด้านนอกของช่วงท่อทดสอบมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนสำหรับให้ความร้อนภายใต้สภาวะเงื่อนไขพลศาสตร์ความร้อนคงที่ เครื่อง Digital differential pressure ถูกใช้สำหรับอ่านค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากจุดวัดค่าความดันที่อยู่คร่อมช่วงท่อทดสอบ

จุดวัดความดันสถิตย์ 2 จุด อยู่ที่ด้านบนของท่อเพื่อวัดความดันตกคร่อมตามแนวกันของส่วนทดสอบ เพื่อใช้หาค่าตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งจุดที่วัด จุดแรกตำแหน่ง 40 มิลลิเมตรจากขอบทางเข้าส่วนทดสอบ และจุดสอง 40 มิลลิเมตรจากขอบทางออกส่วนทดสอบ ความดันตกคร่อม วัดโดยใช้เครื่องวัดผลต่างความดันแบบดิจิตอลเชื่อมต่อจุดวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 มิลลิเมตร

#### 4.4.2 อุปกรณ์ติดตั้งปีกบางที่ใช้ทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ทดลองมีลักษณะเป็นเส้นลวดยาวตรง โดยมีปีกบางถูกติดตั้งตามแนวยาว ใช้สอดใส่ในท่อกลม เพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ โครงครีบบีโคงตัวแบ่งเป็น 4 ส่วนหลัก ๆ คือ มุมปะทะของปีกบางเท่ากับ  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  และ  $45^\circ$ , มุมโค้งของครีบบีโคงเท่ากับ  $120^\circ$ ,  $90^\circ$  อัตราส่วนความสูงเท่ากับ 10% และ 20% , ระยะพิทช์เท่ากับ 0.5 และ 1

#### 4.5 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ในส่วนทดสอบของชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม
2. เปิดสวิทช์เครื่องอัดอากาศ ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง จากนั้นปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงความเร็วรอบการทำงานของเครื่องอัดอากาศเพื่อให้ได้อัตราการไหลของอากาศตรงกับช่วงความเร็วที่กำหนด โดยดูอัตราการไหลของอากาศในระบบจากค่าความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิส
3. วัดค่าความดันตกคร่อมส่วนทดสอบ ที่ความเร็วลมทั้ง 11 ระดับตามกรณีศึกษา จากนั้นปรับความเร็วลมที่ค่าความเร็วลมค่าแรกของการทดสอบ
4. เปิดสะพานไฟจ่ายไฟให้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ปรับค่าความต่างศักย์แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับจ่ายไฟให้กับแผ่นทำความร้อน เพื่อให้ความร้อนกับผิวท่อด้วยเงื่อนไขพลัสความร้อนคงที่
5. สังเกตอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ทั้ง 26 ตำแหน่ง คือ อุณหภูมิผิวทดสอบ 24 ตำแหน่ง และอุณหภูมิทางเข้า และทางออก 2 ตำแหน่ง ให้อุณหภูมิคงที่ แล้วทำการบันทึกผล อุณหภูมิผิวทดสอบ อุณหภูมิทางเข้า และอุณหภูมิทางออกส่วนทดสอบ
6. ปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่มความเร็วลมตามค่าที่ออกแบบไว้ค่าต่อไปจนครบทั้ง 10 ระดับซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์อยู่ตั้งแต่  $Re = 5,000$  ถึง  $24,000$  แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 4-5
7. เปลี่ยนกรณีศึกษาเป็นพารามิเตอร์อื่นในส่วนทดสอบของชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมแล้วดำเนินการทดลองตามขั้นตอน 2 ถึง 6 ตามลำดับ เพื่อเก็บค่าความดันตกคร่อมส่วนทดสอบ อุณหภูมิผิวทดสอบ อุณหภูมิทางเข้า และอุณหภูมิทางออกส่วนทดสอบ ตามค่าความเร็วลมที่ออกแบบไว้ทั้ง 11 ระดับ
8. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของเลขนัสเซลท์ ค่าการสูญเสียความดันซึ่งอยู่ในรูปของตัวประกอบเสียดทาน และค่าตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

## บทที่ 5

# ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 5.1 บทนำ

ในบทนี้ คือผลการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการติดตั้งอุปกรณ์ที่จะเปลี่ยนลักษณะการไหลโดยอุปกรณ์นั้นมีลักษณะเป็นครีบอกตัววี ซึ่งผลการทดลองนั้นจะแปรเปลี่ยนไปตามมุมเข้าปะทะของครีบอก มุมครีบอก ความสูงของอุปกรณ์ และระยะห่างระหว่างตัวครีบอกตัววีแต่ละตัว จึงได้ทำแสดงผลของการศึกษามาในรูปแบบของกราฟของเลขนัสเซิลท์ ค่าตัวประกอบเสียดทาน และการประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น โดยการศึกษาที่ตัวแปรต่าง ๆ ที่แปรเปลี่ยนไปของอุปกรณ์ครีบอกตัววี

1. การศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และความดันสูญเสียของมุมปะทะที่แตกต่างกันในแต่ละกรณีศึกษา
2. การศึกษาอิทธิพลของมุมโค้งของครีบอก เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และความดันสูญเสียที่เกิดจากผลกระทบของมุมโค้งของครีบอกที่แตกต่างกันในแต่ละกรณีศึกษา
3. การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความสูงของครีบอกที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และความดันสูญเสียที่เกิดจากผลกระทบของอัตราส่วนความสูงของครีบอกที่แตกต่างกันในแต่ละกรณีศึกษา
4. การศึกษาอิทธิพลของระยะพิตช์ที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และความดันสูญเสียที่เกิดจากผลกระทบของระยะพิตช์ที่แตกต่างกันในแต่ละกรณี
5. ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์

วิเคราะห์ผลการทดลองของค่าการถ่ายเทความร้อนโดยตัวแปรที่ใช้คือเลขนัสเซิลท์ และความดันสูญเสียโดยตัวแปรของตัวประกอบเสียดทานเนื่องจากการวิเคราะห์ค่าการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนนั้นจำเป็นต้องรู้ค่าการเปรียบเทียบอัตราระหว่างการถ่ายเทความร้อน และความดันสูญเสียที่เพิ่มขึ้นกับท่อเปล่า จากนั้นจึงคำนวณการค่าการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์นั้นจะทำการทดลองที่กำลังขับของเครื่องเดียวกัน

### 5.2 ผลการทดสอบท่อนังเรียบ

ได้ทำการศึกษาความน่าเชื่อถือของชุดทดลองที่จะใช้ในการทดลองนั้นจำเป็นต้องอ้างอิงผลของค่าของตัวเลขนัสเซิลท์ และตัวประกอบความเสียดทานทั้งสองที่ได้จากการทดลองจากชุดทดลองโดยเปรียบเทียบค่ากับค่าทางทฤษฎีแนวคิดที่ได้รับการยอมรับ ของผลตัวเลขนัสเซิลท์ของ Dittus-Boelter และค่าตัวประกอบความเสียดทานของ Blasius

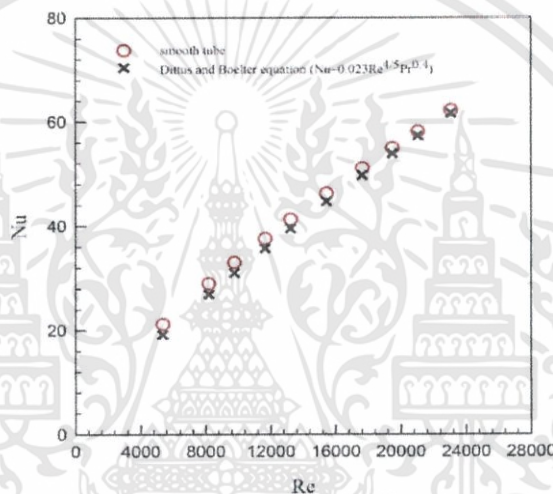
ทฤษฎีแนวคิดของ Dittus-Boelter

$$Nu = 0.023Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5.1)$$

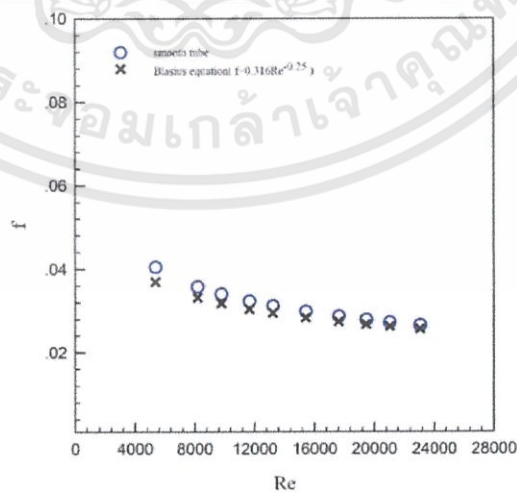
ทฤษฎีแนวคิดของ Blasius

$$f = 0.316Re^{-2.5} \quad (5.2)$$

รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซิลท์ที่ได้จากการทดลองกับสมการที่ 5.1 พบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากชุดทดลองจะมีค่ามากกว่าค่าการถ่ายเทความร้อนจากสหสัมพันธ์สำหรับการเปรียบเทียบจะให้ค่าความผิดพลาดไม่เกิน 5% และรูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากการทดลองกับสมการที่ 5.2 พบว่าค่าตัวประกอบความเสียดทานของชุดทดสอบมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากสหสัมพันธ์ในการเปรียบเทียบมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 6%



รูปที่ 5.1 กราฟการเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซิลท์ของท่อเปล่ากับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter



รูปที่ 5.2 กราฟการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อเปล่ากับสหสัมพันธ์ของ Blasius

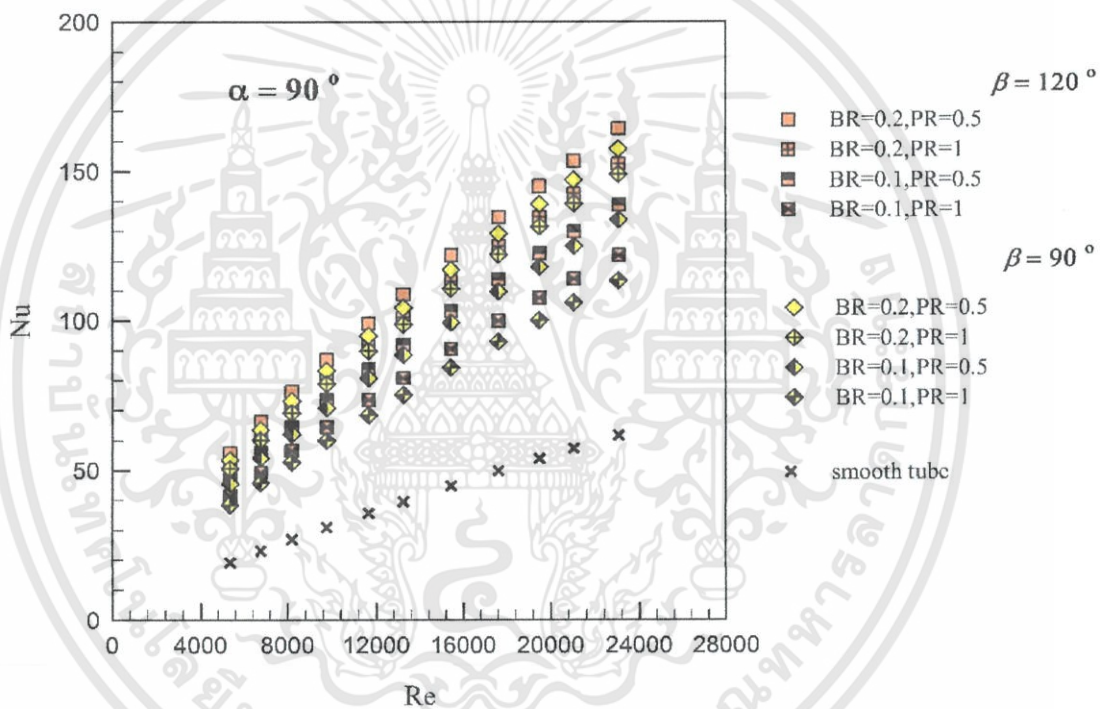
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การทดลองโดยศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่แตกต่างกัน

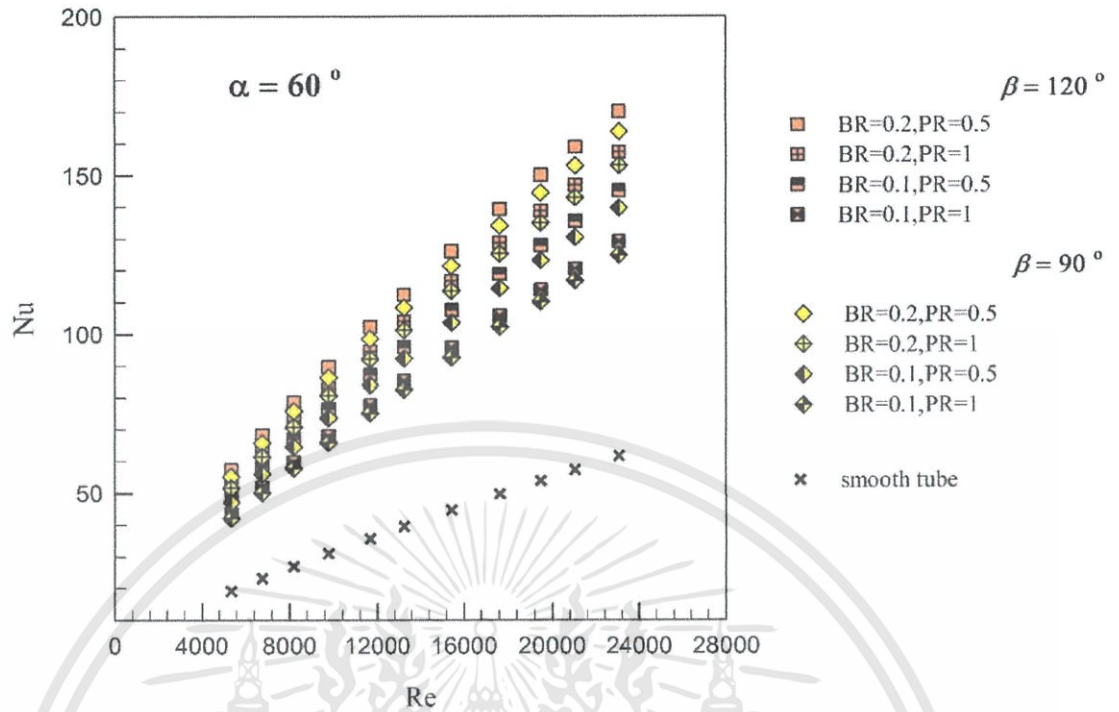
เป็นการเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซิลท์ของกรณีศึกษาของการติดตั้งอุปกรณ์ครีบอกโค้งตัววีที่มุมปะทะต่างกันคือมุม  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  ร่วมกับมุมครีบอกอีก 2 มุมคือ  $120^\circ$ ,  $90^\circ$  ที่อัตราส่วนระยะพิตซ์เท่ากับ 0.5, 1.0 และอัตราส่วนความสูงของปีกเท่ากับ 0.1 และ 0.2 ซึ่งจะมีทั้งหมด 24 กรณีที่ศึกษา

ผลการทดลองพบว่าการติดตั้งอุปกรณ์ที่มุมเข้าปะทะเท่ากับ  $90^\circ$  จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดโดยที่มุมเข้าปะทะเท่ากับ  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  มีค่าการถ่ายเทความร้อนรองลงมาตามลำดับมุมที่ลดลง ดังนั้นหมายความว่ามุมเข้าปะทะนั้นมีผลต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลในท่อส่งผลให้เกิดการไหลปั่นป่วนภายใน แสดงได้ว่าการเปลี่ยนไปของมุมเมื่อมุมมากก็ส่งผลให้ขีดขวางการไหลมาก

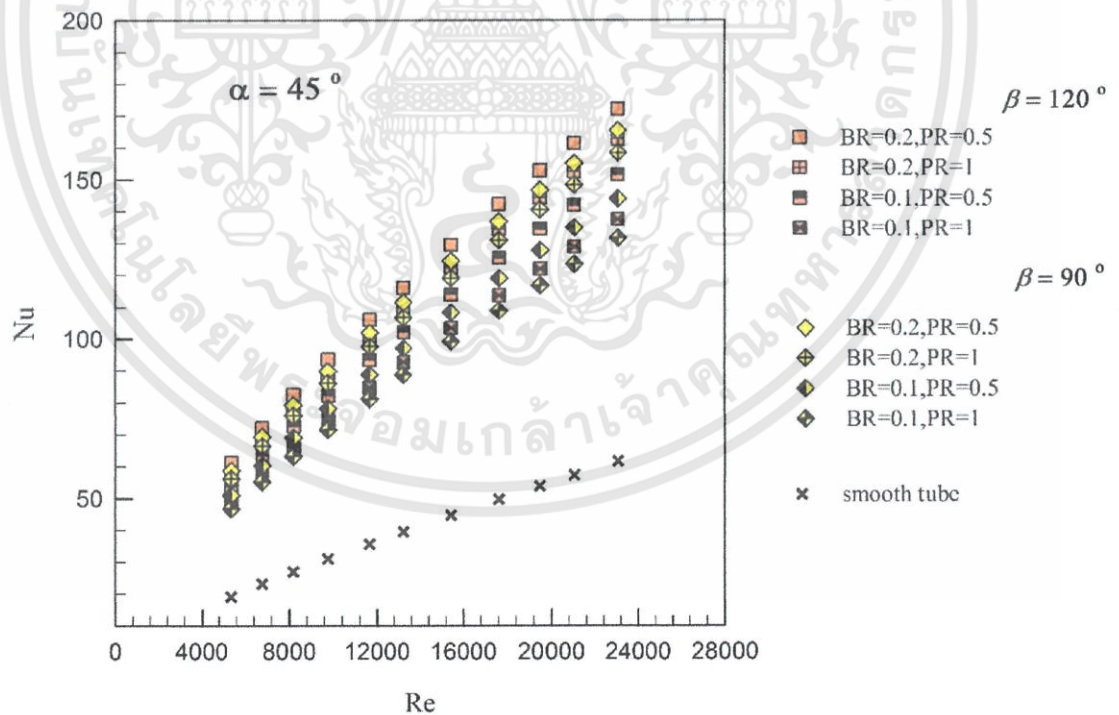
ซึ่งกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลท์ และค่าตัวประกอบเสียดทานของแต่ละกรณี การติดตั้งอุปกรณ์ในลักษณะต่างๆจะแสดงผลตามมุมเข้าปะทะเดียวกัน และในแต่ละมุมเข้าปะทะจะแบ่งได้เป็น 8 กรณีคือมุมของครีบอก อัตราส่วนความสูงของปีก อัตราส่วนระยะพิตซ์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนที่มุมปะทะ  $90^\circ$

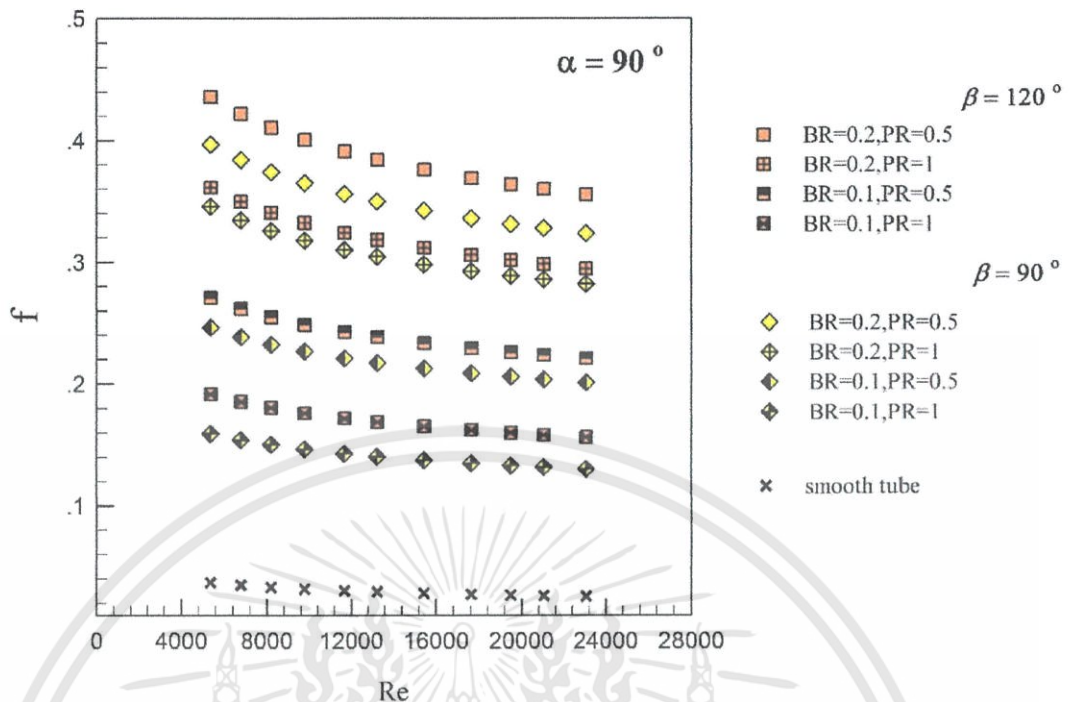


รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนที่มุมปะทะ  $60^\circ$

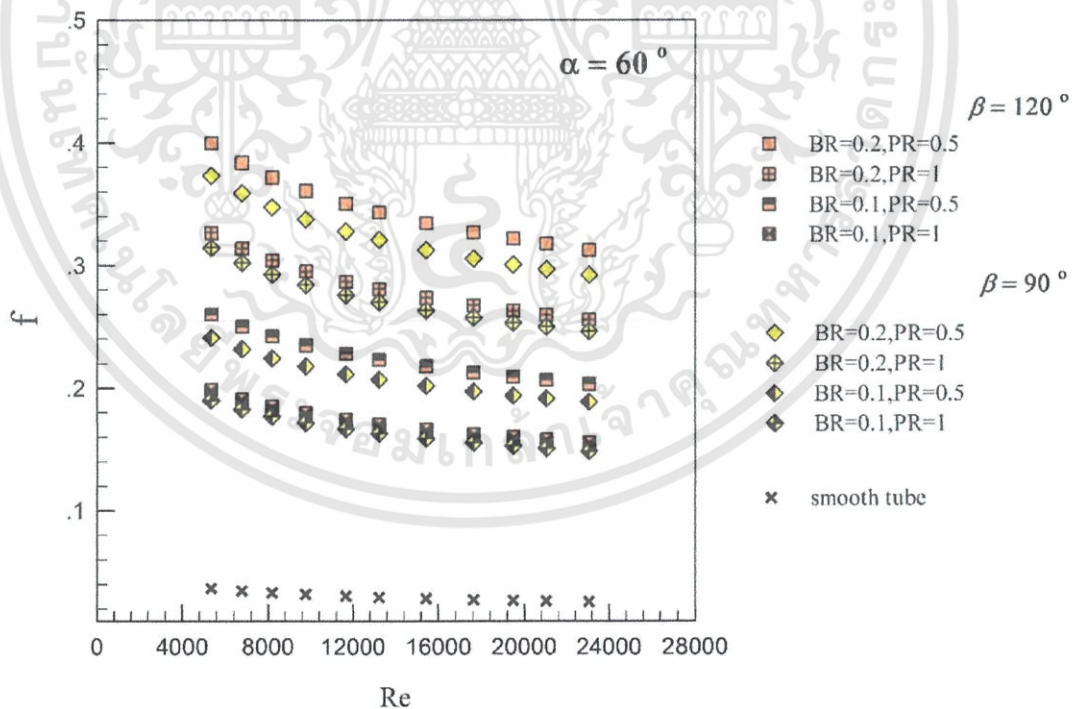


รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนที่มุมปะทะ  $45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

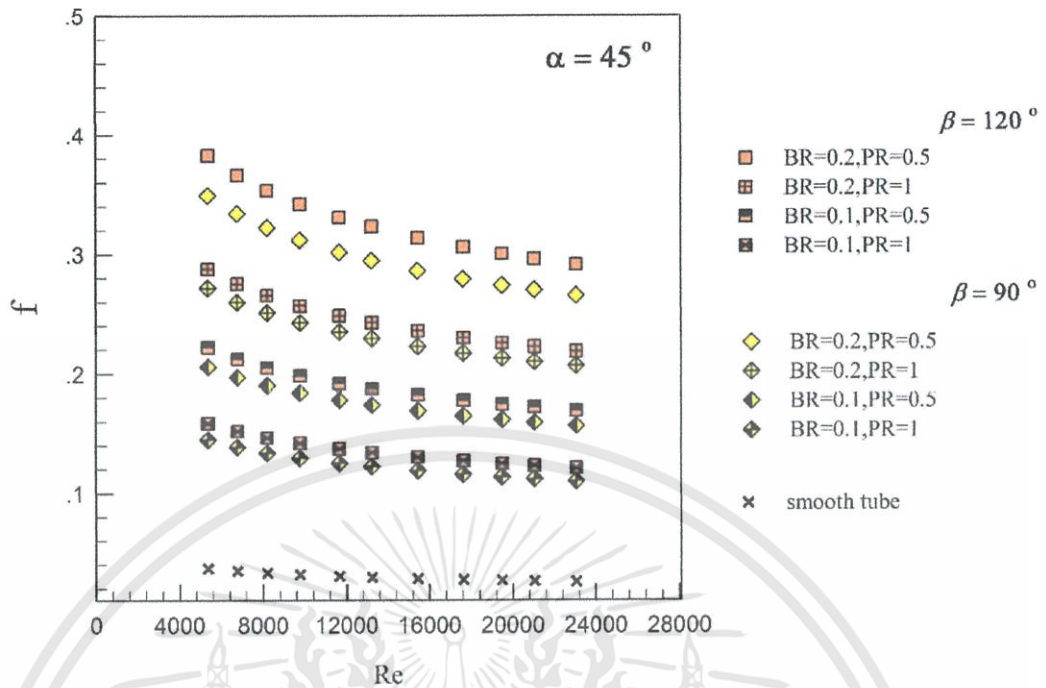


รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานที่มุมปะทะ  $90^\circ$



รูปที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานที่มุมปะทะ  $60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

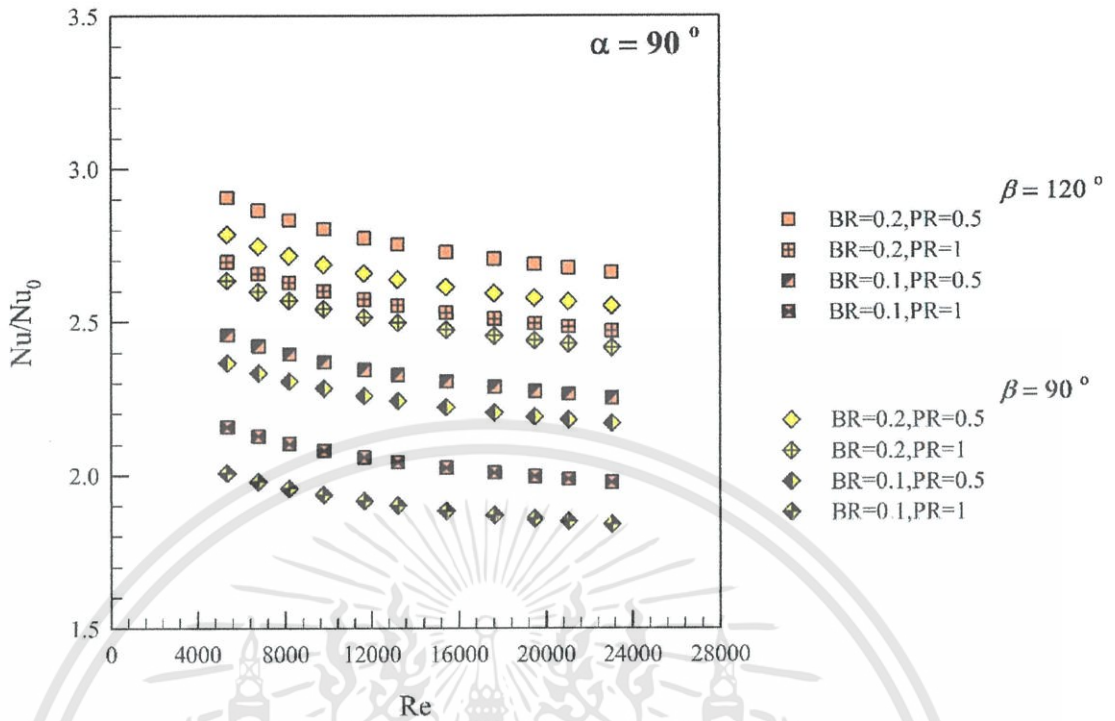


รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานที่มุมปะทะ  $45^\circ$

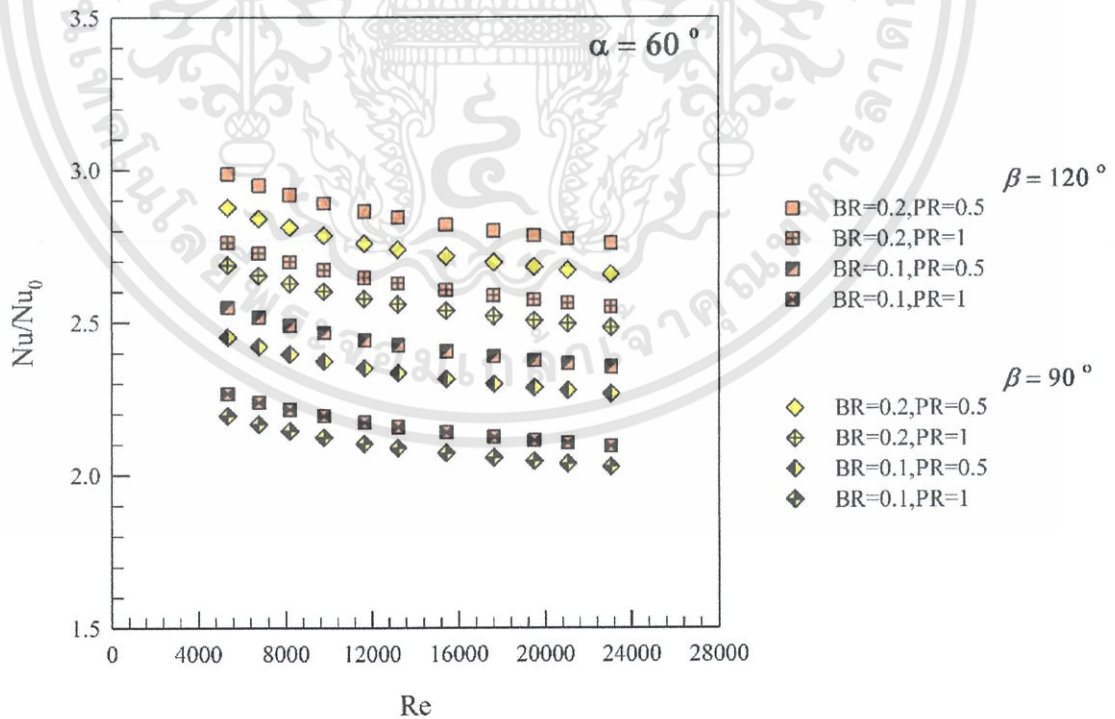
#### 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์

ทั้ง 3 กราฟดังรูปที่รูป 5.9, 5.10 และ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ต่อเลขนัสเซลท์ของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานต่อค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ เพื่อที่จะหาค่าการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของแต่ละกรณีของอุปกรณ์ที่ติดตั้ง

พบว่าที่มุมปะทะ  $45^\circ$  สัดส่วนระยะพิชิตต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 0.5 สัดส่วนความสูงปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 0.2 มีค่านี้สเซลท์เฉลี่ยมากที่สุดมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบเฉลี่ย 3.56 เท่าที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 5364 และที่มุมปะทะ  $90^\circ$  ค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากที่สุดมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบเฉลี่ย 20.83 เท่าที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 23058

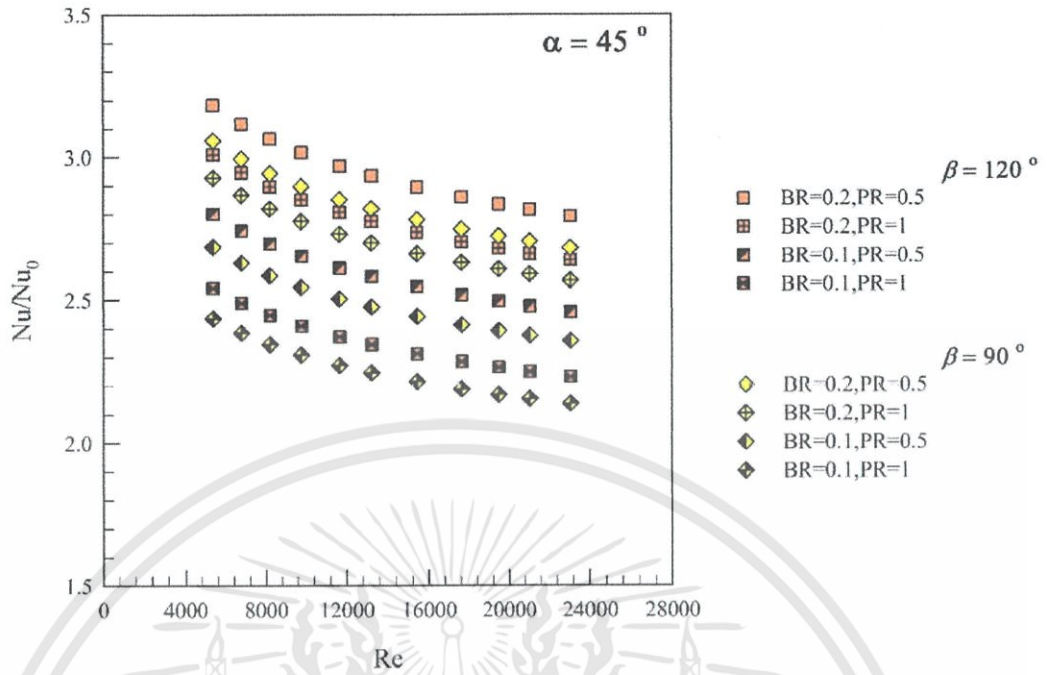


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ  $90^\circ$



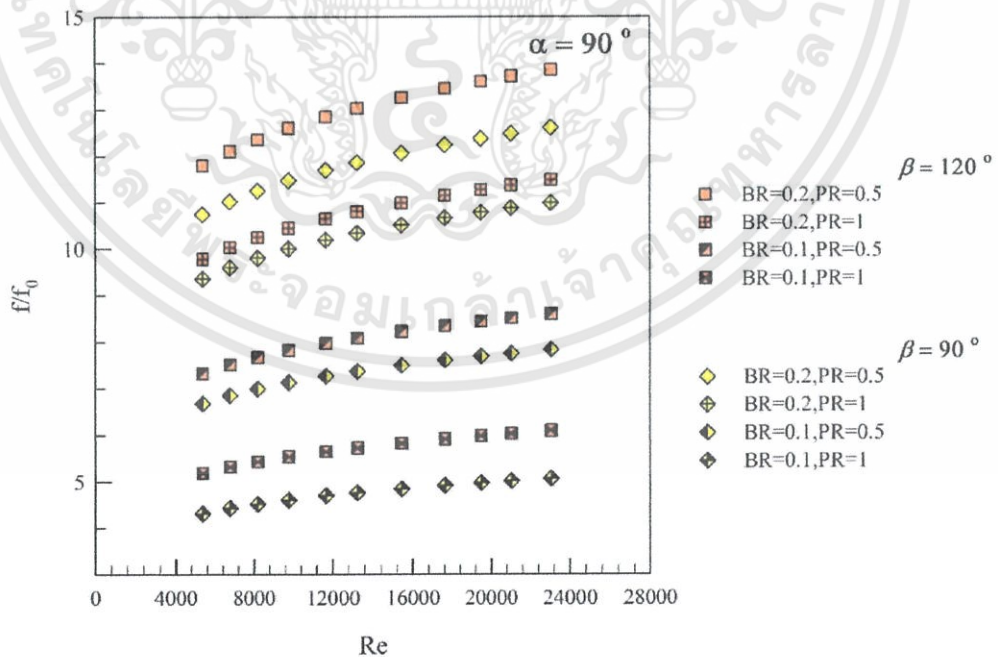
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ  $60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



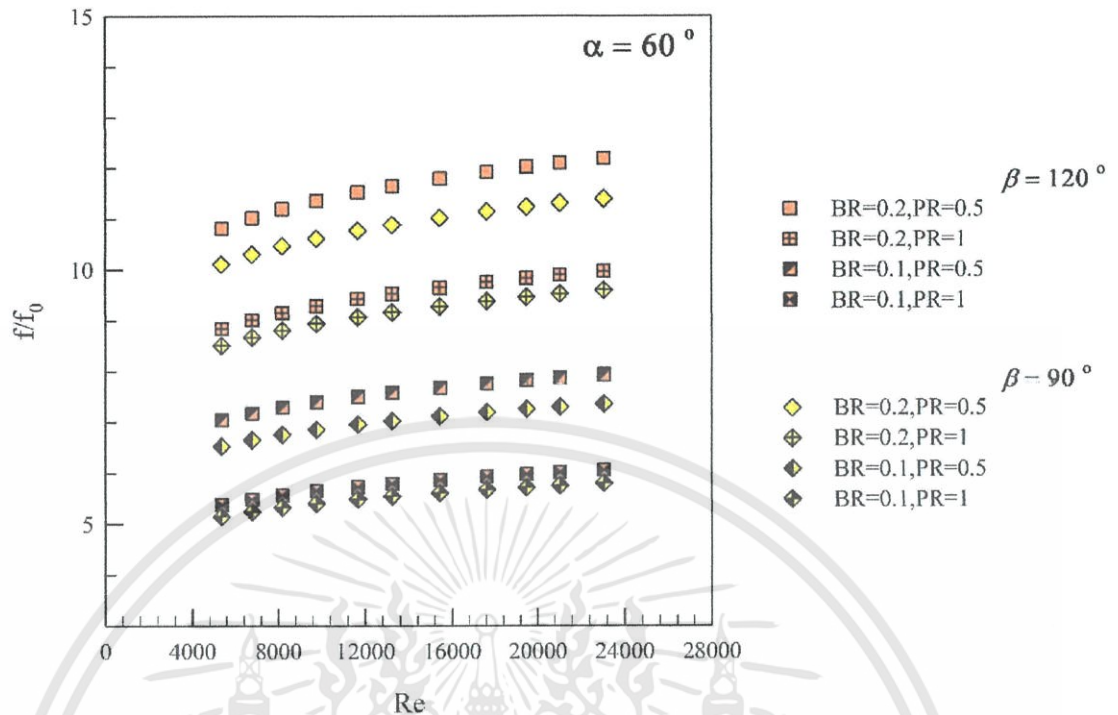
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ  $45^\circ$

### 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์

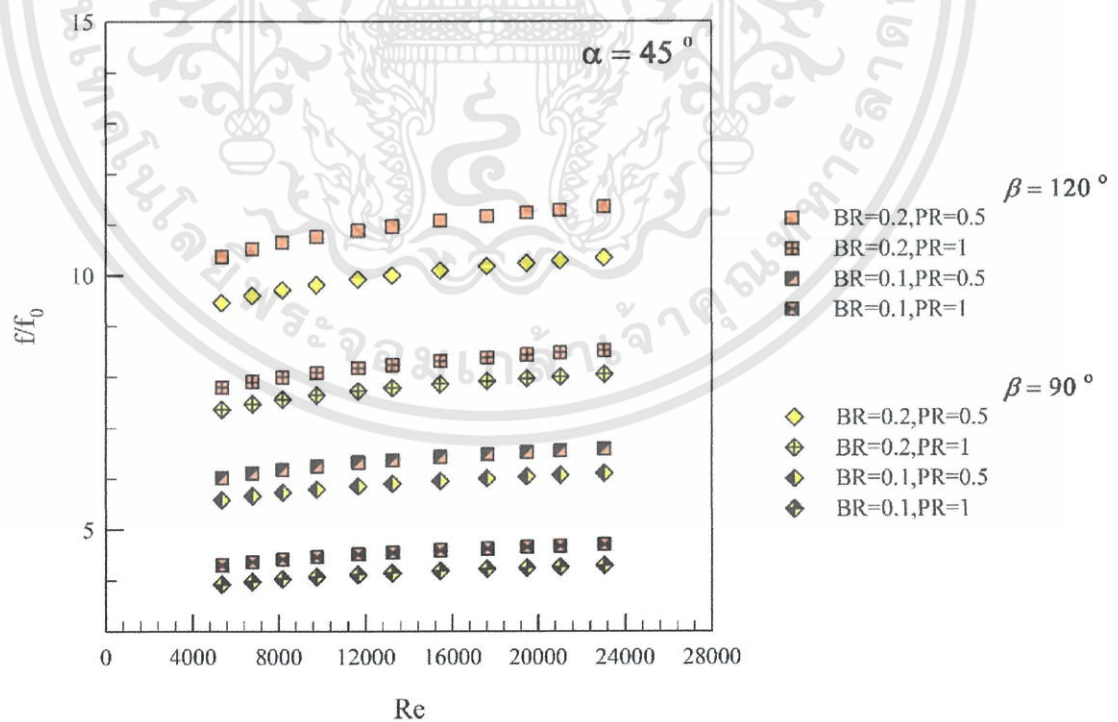


รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ  $90^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ  $60^\circ$

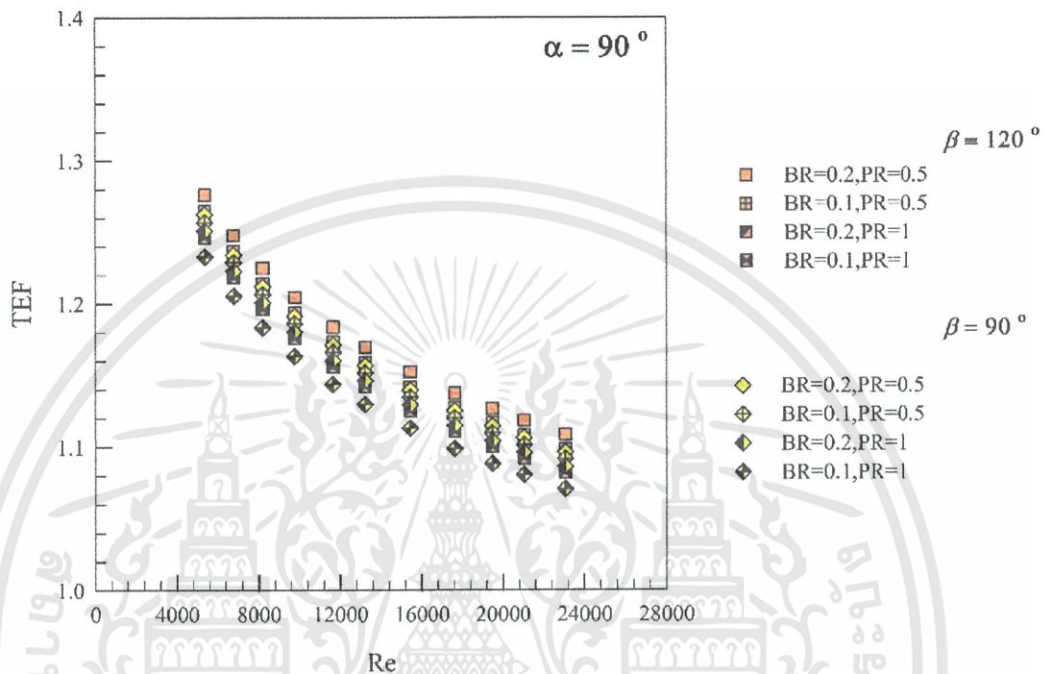


รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าการเพิ่มขึ้นของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ  $45^\circ$

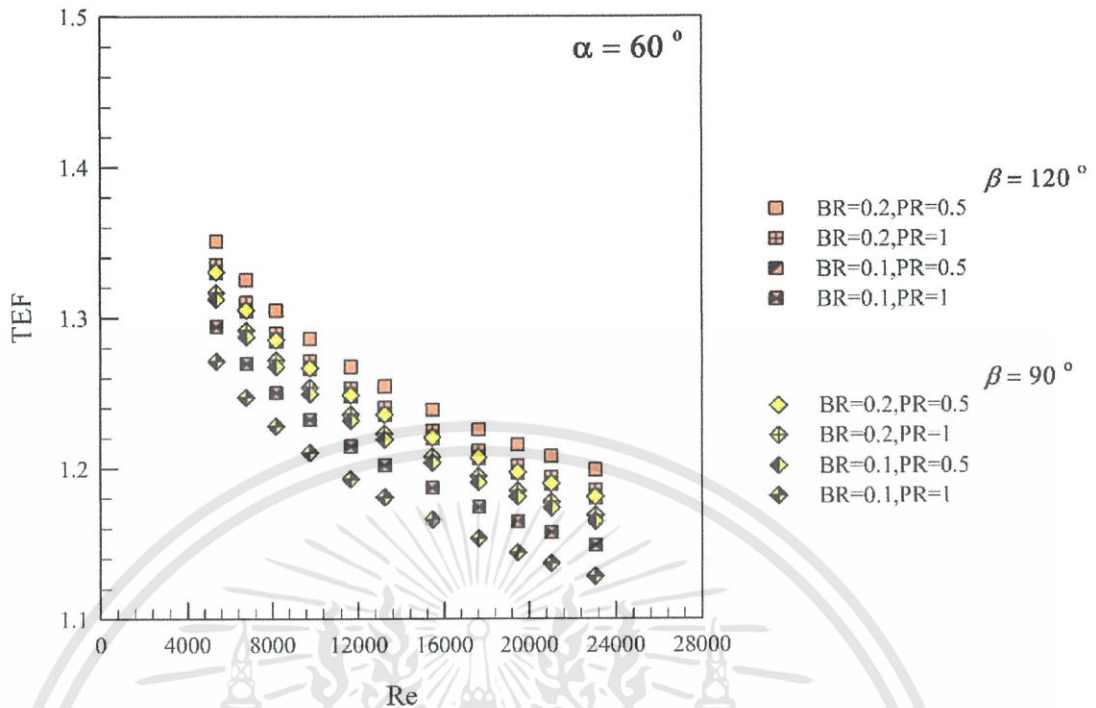
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นของถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์

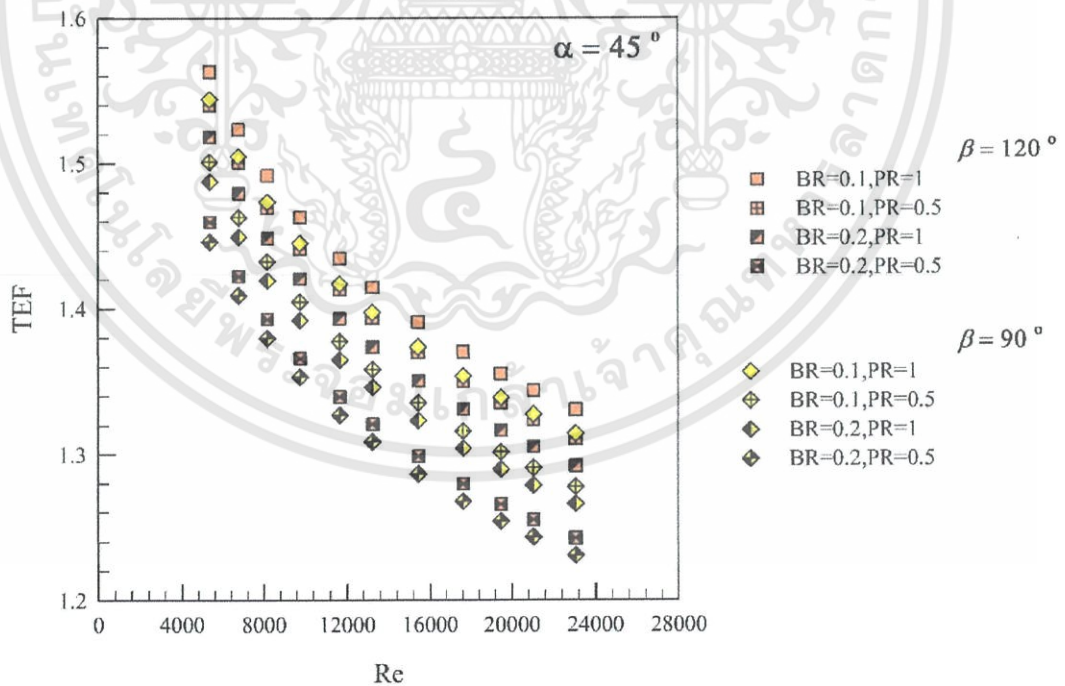
จากการทดลองการผลของเพิ่มของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุดภายใต้เงื่อนไขการศึกษานี้มีค่าประมาณ 1.56 สำหรับกรณีการติดตั้งปีกบางมุมเท่ากับ  $45^\circ$  สัดส่วนระยะพิชต์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 1 สัดส่วนความสูงเท่ากับ 0.1 ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ 5364



รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ  $90^\circ$



รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ  $60^\circ$



รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเลขเรย์โนลด์ของมุมเข้าปะทะ  $45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

## 6.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของอุปกรณ์ที่ติดตั้งต่อช่วงทดลองแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตัวแปรที่เปลี่ยนไปของอุปกรณ์ที่ติดตั้งคือ มุมเข้าปะทะ  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อของการติดตั้งปีกบาง เท่ากับ 0.5, 1.0 โดยมีอัตราส่วนความสูงของปีกบางต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 0.1 และ 0.2 ภายใต้สภาวะเงื่อนไขค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ในช่วงของตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าระหว่าง 5000 ถึง 24,000 พบว่าการสอดใส่ปีกบางทุกกรณีจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบความเสียหายที่สูงกว่ากรณีท่อเปล่า

1. การศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่แตกต่าง จากผลการศึกษาการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ โดยมุมที่ส่งผลกับการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดคือ  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  ตามลำดับ โดยค่าการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนของมุมปะทะอยู่ระหว่าง 3.56-2.00 เท่าของการถ่ายเทความร้อนของท่อเปล่า และค่าการเพิ่มขึ้นของความตัวประกอบเสียหายของการอุปกรณ์ติดตั้งในแต่ละมุมปะทะอยู่ระหว่าง 14.51-4.31 เท่าของการถ่ายเทความร้อนของท่อเปล่า ตลอดช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ โดยค่าการถ่ายเทความร้อน และค่าตัวประกอบเสียหายมากที่สุดจะเป็นกรณีเดียวกันคือมุมเข้าปะทะ  $90^\circ$  โค้งของครีป  $180^\circ$  อัตราส่วนความสูง 0.2 ระยะพิชต์ 0.5 ทำให้พบว่ามุมปะทะมากจะเกิดการขวางการไหลมากยิ่งขึ้นด้วย

2. การศึกษาอิทธิพลของมุมโค้งของครีปที่แตกต่าง จากผลการศึกษาการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ โดยมุมที่ส่งผลกับการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดคือ  $180^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $90^\circ$  ตามลำดับ จากผลการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนของมุมโค้งของครีปจะเห็นได้ว่าขึ้นอยู่กับมุมโค้งของครีปมากจะทำให้การขวางมากขึ้นจึงเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอีกด้วย

3. การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความสูงของครีปที่แตกต่าง จากผลการศึกษาการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ โดยศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนความสูงครีปสองค่าคือ 0.1 และ 0.2 จากผลการทดลองการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนของอัตราส่วนความสูงครีปจะเห็นได้ว่าเมื่อมีอิทธิพลจากอัตราส่วนความสูงครีปมากขึ้นสูงสุดที่  $BR = 0.2$  จะทำให้การขวางมากขึ้นจึงเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอีกด้วย

4. การศึกษาอิทธิพลของระยะพิชต์ที่แตกต่าง จากผลการศึกษาการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ โดยศึกษาผลกระทบของระยะพิชต์สองค่าคือ 0.1 และ 0.2 จากผลการทดลองการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนของระยะพิชต์จะเห็นได้ว่าเมื่อมีอิทธิพลจากระยะพิชต์มากขึ้นจะทำให้การขวางมากขึ้นสูงสุดที่  $PR = 0.5$  จึงเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอีกด้วย

5. ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนสูงสุดประมาณ 1.56 ภายใต้กรณีการศึกษาที่เงื่อนไขมุมเข้าปะทะเท่ากับ  $45^\circ$  ร่วมทั้งมุมโค้งของครีปเท่ากับ  $120^\circ$  สัดส่วนระยะพิชต์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 1 สัดส่วนความสูงปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 0.1 ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ 5364

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สรุปผลการทดลองของทุกกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์ สามารถเปลี่ยนแปลงการไหลของอากาศภายในท่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งส่งผลดีแก่การถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในแง่การประหยัดพลังงานสำหรับอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น หรือการในแง่การประหยัดต้นทุนสำหรับการจัดสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดเล็กลงเนื่องจากความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มากขึ้น

ตารางที่ 6.1 ตารางแสดงผลการทดลองในแต่ละกรณีศึกษา

Case Study	Parameter				Results		
	$\alpha$	$\beta$	BR	PR	$\overline{Nu}/Nu_0$	$\overline{f}/f_0$	$\overline{TEF}$
1	90°	120°	0.2	0.5	2.76	12.97	1.18
2				1	2.56	10.75	1.17
3			0.1	0.5	2.34	8.05	1.16
4				1	2.05	5.70	1.15
5		90°	0.2	0.5	2.65	11.81	1.16
6					1	2.51	10.28
7			0.1	0.5	2.25	7.33	1.15
8					1	1.91	4.74
9	60°	120°	0.2	0.5	2.85	11.60	1.26
10				1	2.64	9.49	1.25
11			0.1	0.5	2.43	7.55	1.24
12					1	2.17	5.77
13		90°	0.2	0.5	2.75	10.84	1.24
14					1	2.57	9.13
15			0.1	0.5	2.34	7.00	1.23
16					1	2.10	5.52
17	45°	120°	0.2	0.5	2.95	10.93	1.33
18				1	2.79	8.22	1.38
19			0.1	0.5	2.60	6.35	1.40
20					1	2.36	4.53
21		90°	0.2	0.5	2.84	9.97	1.32
22					1	2.72	7.76
23			0.1	0.5	2.47	5.88	1.37
24					1	2.26	4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนการไหลของของไหลภายในท่อ ซึ่งการเปลี่ยนการไหลนั้นเกิดจากอิทธิพลของปีก มุมโค้งของครีบอก ซึ่งจากการศึกษาทำให้ทราบว่ารูปทรงที่กำหนดต่างๆมีผลต่อการไหลของอากาศทั้งสิ้นพร้อมทั้งจำนวนของครีบอกที่ติดตั้ง โดยผลของการศึกษา และพัฒนาต่อไปควรจะศึกษาถึงตัวแปรอื่น ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบให้ได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการเพิ่มสมรรถนะความร้อนมากขึ้น เช่น

1. ศึกษาอิทธิพลของระยะพิทช์ค่าต่าง ๆ ครีบอก และปีกในรูปแบบอื่น ๆ
2. ศึกษาอิทธิพลของรูปร่าง และโครงสร้างของครีบอกสี่เหลี่ยมอื่น ๆ เมื่อปรับเปลี่ยนระยะตัดมุมของครีบอก
3. ศึกษาอิทธิพลของปีก และครีบอกที่มีมุมปะทะค่าอื่น ๆ
4. ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนรูปทรง ( Aspect ratio, AR ) ค่าอื่น ๆ ของท่อทดสอบ



## บรรณานุกรม

- [1] Yakut, K. and B. Sahin, *Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchanger*. ScienceDirect, 2004. 78: p. 273-288.
- [2] Tan, X.-h., et al., *Heat transfer and pressure drop performance of twisted oval tube heat exchanger*. Applied Thermal Engineering, 2013. 50(374-383).
- [3] Promvonge, P. and S. Eiamsa-ard, *Heat transfer augmentation in circular tube using V-nozzle turbulator inserts and snail entry*. ScienceDirect, 2007. 32: p. 332-340.
- [4] Lee, D.H., et al., *Detailed measurement of heat/mass transfer with continuous and multiple V-shaped in rectangular channel*. Energy, 2009. 34: p. 1770-1778.
- [5] Han, Glicksman, L.R. and Rohsenow, W.M. 1978. "An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces." Int. J. Heat Mass Transfer. 21 : 1143-1156.
- [6] Ahn, S.W. 2001. "The effects of roughness types on friction factors and heat transfer in roughened rectangular duct." Int. Comm. Heat Mass Transfer. 28 : 933-942
- [7] Promvonge, P. and C. Suriya, "Experimental study on Heat transfer augmentation in a round tube with V-shaped ribs." ScienceDirect, 2013. 49: p. 290-301.
- [8] Ahmet and Teoman 2005. "energy dissipation analysis of transient heat transfer for turbulent flow in circular tube with baffle inserts" ScienceDirect. 26 : 178-185.
- [9] สมบัติ ทำนา. 2552. "การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบลามินาร์ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้แผ่นกั้นวางเอียง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [10] Sripattanapipat, S. 2010. "Laminar flow and heat transfer characteristics in a channel with triangular wavy baffle" Doctor of Engineering thesis in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [11] Sripattanapipat, S. and Promvonge, P. 2009. "Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles." Int. Comm. Heat Mass Transfer. 36 : 32-38.

- [12] Choi, C., Rhee, D.H. and Cho, H.H. 2002. "Heat/mass transfer and pressure drop in a square duct with V-shaped ribs." *KSME. J. Heat Transfer.* 26 : 1542-1551.
- [13] Zhang, Y.M., Gu, W.Z. and Han, J.C. 1994. "Heat transfer and friction in rectangular channels with ribbed or ribbed-grooved walls." *ASME J. Heat Transfer.* 116 : 58-65.
- [14] Taslim, M.E., Li, T. and Kercher, D.M. 1996. "Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped, and discrete ribs on two opposite walls." *ASME J. Turbomachinery.* 118 : 20-28.
- [15] Gentry, M.C. and Jacobi, A.M. 1997. "Heat transfer enhancement by delta-wing vortex generators on a flat plate: vortex interactions with the boundary layer." *Exp. Thermal Fluid Science.* 14 : 231-242.
- [16] สมพล สุกุลหลง. 2551. "การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องแผ่นขนานโดยใช้ครีบริบรูปตัววี." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] วิษณุ อำไพจิตร. 2552. "การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อแผ่นขนานโดยใช้ครีบริบหยัก." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] Cengel, Y.A. and Ghajar, A.J. 1998. "Internal forced convection." Kanoglu, M. *Heat Transfer And Mass Transfer.* (465-507) . Singapore: Mc Graw Hill.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg K)	$\mu \times 10^7$ (N s/m <sup>3</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \times 10^6$ (W/m K)	$\alpha \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
100	3.25562	1.032	71.1	2.0	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.59	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	22.5	0.707
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.990	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	67.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728

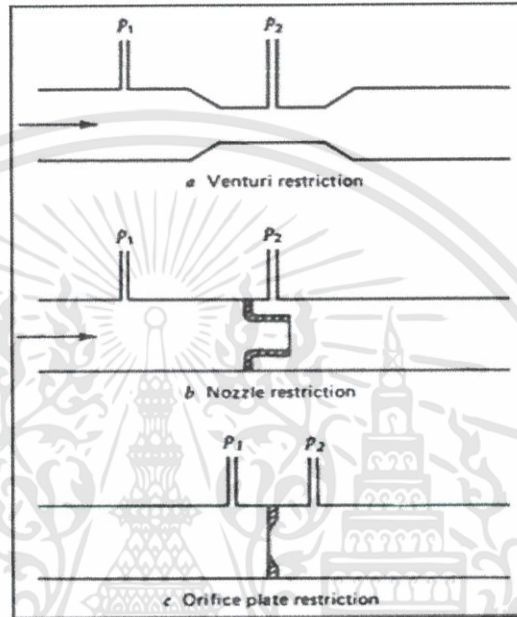
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

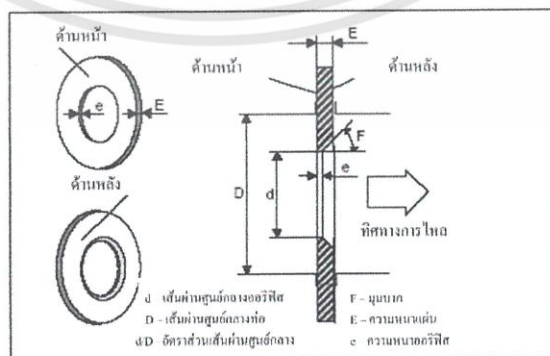
### ข-1 ออริฟิส

การวัดความดันตกคร่อมนั้นมีหลายรูปแบบ เช่นการทำให้พื้นที่หน้าตัดการไหลลดลง อาจใช้วิธีการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลงก็ได้ (แล้วค่อยขยายขึ้นกลับเป็นขนาดเดิม) แต่การใช้แผ่น orifice ก็มีข้อดีตรงที่ประหยัดพื้นที่ติดตั้ง และด้วยการเปลี่ยนแผ่น orifice ที่มีขนาดรูต่างกันก็ทำให้สามารถวัดอัตราการไหลในช่วงต่าง ๆ ได้ ดังรูปที่ ข-1 โดยแบบที่เหมาะสมแก่การใช้งานของอุปกรณ์การทดลองเรื่องนี้คือแบบ C (Orifice plate)



รูปที่ ข-1 Type of Pressure meter

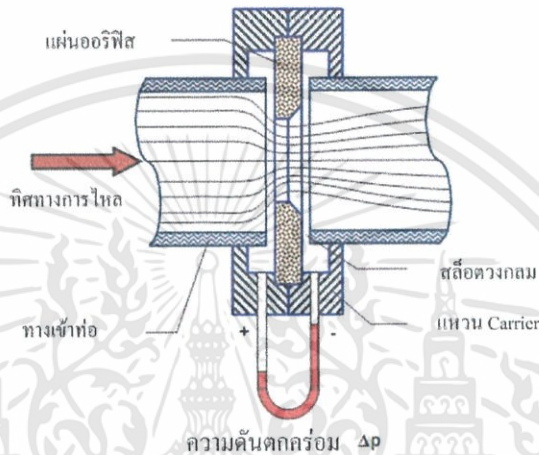
การวัดอัตราการไหลด้วย orifice ใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงความดันเมื่อของไหลไหลผ่านบริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัดการไหลลดลง การทำให้เกิดบริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัดการไหลลดลงมักทำโดยการสอดแผ่นกั้นที่มีรูเจาะอยู่ตรงกลาง (เรียกว่าแผ่น orifice) เข้าไปขวางทิศทางการไหลเอาไว้ ดังนั้นจึงทำการวัดความดันของไหลก่อนไหลผ่านและหลังจากที่ไหลผ่านแผ่น orifice และนอกจากนั้นยังสามารถนำค่าผลต่างความดันนี้ไปคำนวณหาอัตราการไหลได้



รูปที่ ข-2 Standard orifice plate

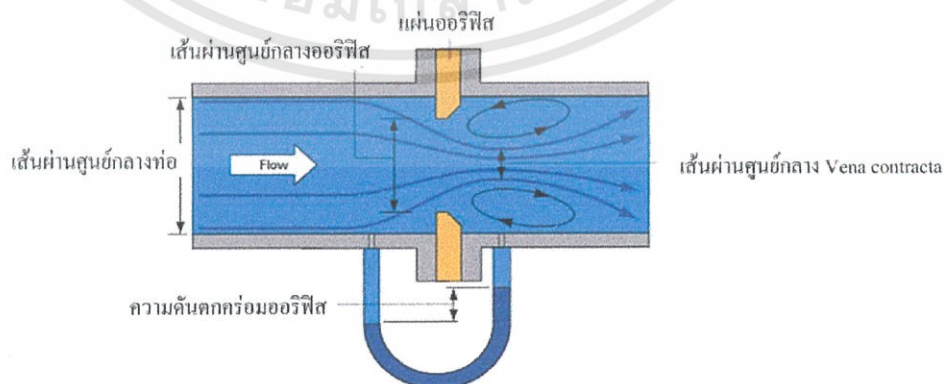
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งแผ่น orifice จะใช้หน้าแปลนพิเศษแตกต่างไปจากหน้าแปลนที่ใช้เชื่อมต่อท่อทั่วไป กล่าวคือหน้าแปลนที่ใช้สำหรับติดตั้งแผ่น orifice จะมีการเจาะรูสำหรับต่อท่อไปยังอุปกรณ์วัดความดันลดคร่อมแผ่น orifice แผ่นออริฟิสเป็นแผ่นบางๆ ที่ถูกจับยึดระหว่างขอบของท่อ เนื่องจากมีรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่าย ๆ ดังนั้นเครื่องมือวัดอัตราการไหลชนิดนี้นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีโครงสร้างง่ายต่อการใช้งาน ราคาถูก ติดตั้งง่าย แต่มีข้อเสีย คือ มีค่าความถูกต้องค่อนข้างน้อย ย่างการวัดจำกัด และไม่สามารถใช้วัดอัตราการไหลของ ๆ เหลวที่มีสารตกตะกอนจำพวกของแข็งปนอยู่ด้วยได้ และนอกจากนั้นจุดวัดความดันสำหรับออริฟิสนั้น สามารถกำหนดตำแหน่งได้หลายตำแหน่ง



รูปที่ ข-3 โครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิส

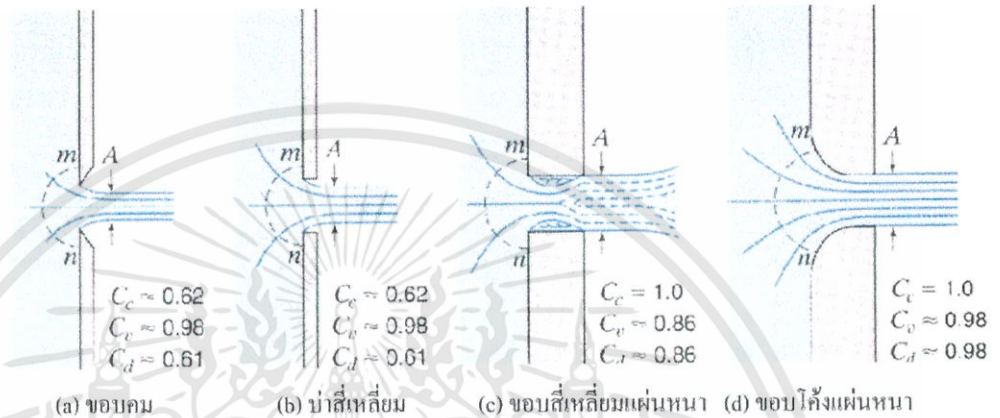
สำหรับการวัดอัตราการไหลของของไหลภายในท่อ และจัดได้ว่าออริฟิสเป็นเครื่องมือวัดที่เกิดขวางการไหลของพื้นที่หน้าตัด ให้ของไหลไหลผ่านออริฟิสมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังแสดงในรูปที่ ข-4 ดังนั้นเมื่อนำออริฟิสไปติดตั้งกับท่อ ซึ่งมีของไหลไหลผ่านจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมออริฟิส ซึ่งความดันตกคร่อมนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการไหล กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลมีค่าสูง ความดันตกคร่อมออริฟิสก็จะมีค่าสูง และถ้าอัตราการไหลมีค่าต่ำ ความดันตกคร่อมออริฟิสก็จะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปออริฟิสจะถูกนำไปใช้ในการหาอัตราการไหลที่สภาวะ Steady state เท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้วัดอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Dynamic Response)



รูปที่ ข-4 การไหลผ่านแผ่นออริฟิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบรรดาเครื่องมือวัดอัตราการไหลทั้งหลาย ออร์ฟิสถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีผู้นำไปใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด ดังนั้นการทดลองชุดนี้จึงได้มีการนำเอาการวัดอัตราการไหลแบบออร์ฟิสมาใช้ ออร์ฟิสมาตรฐานที่มีขอบคม ดังแสดงในรูปที่ ข-5 (a) หรือเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ ข-5 (b) นั้นจะสัมพันธ์ลำน้ำที่ไหลผ่านในลักษณะที่เป็นการสัมผัสแบบเส้น ส่วนออร์ฟิสดังรูปที่ ข-5 (c) และ ข-5 (d) นั้นไม่ใช้เป็นออร์ฟิสมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะลำน้ำที่ไหลผ่านรูออร์ฟิสนั้น ถูกกระทบจากความหนาของแผ่นวัตถุ กับความหยาบของผิว และรัศมีของความโค้ง ดังนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบเพื่อความถูกต้อง



รูปที่ ข-5 ออร์ฟิสแบบต่าง ๆ

ซึ่งเป็นออร์ฟิสที่นำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ จะมีทิศทางการไหลเป็นไปดังรูป C สมมุติว่าของไหลก่อนเข้าปะทะกับออร์ฟิส มีความเร็วคงที่ตลอดหน้าตัดของท่อ (หน้าตัดวงกลม) เท่ากับ  $V_1$  เมตรต่อวินาที ของไหลที่บริเวณด้านหลังของออร์ฟิส จะมีลักษณะเป็นลำของไหล ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำของไหลลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{D}{2}$  เมตร ณ บริเวณจุดวัดความดันที่ 2 ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดที่มีพื้นที่หน้าตัดของการไหลน้อยที่สุด (Vena Contracta) ของ Jet ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Jet จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ 2 ไปแล้ว จุดที่ 2 หรือเรียกว่าจุด Vena Contracta ถือได้ว่าเป็นจุดที่ของไหลที่มีความเร็วเฉลี่ยสูงสุด หรือมีความดันสถิตย์ต่ำสุด (จากสมการของ Bernoulli)

สมมติฐานเบื้องต้นสำหรับการวัดอัตราการไหลด้วยออร์ฟิสในการทดลองนี้ คือ ของไหลที่อยู่ภายในท่อไม่สามารถอัดตัวได้ ความเร็วของของไหลมีค่าคงที่ตลอดหน้าตัด (โดยไม่คิดบริเวณที่เรียกว่า บริเวณกระแสไหลวน) ของไหลไม่มีความหนืด และการไหลเกิดขึ้นแบบ Steady flow

สมการ Bernoulli สามารถนำมาใช้อธิบายคุณสมบัติในการไหลที่จุดใด ๆ ภายในท่อได้ โดยสมการ Bernoulli สำหรับจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของการไหล แสดงในรูปที่ ข-3 สามารถคำนวณหา ค่าอัตราการไหลเมื่อติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบออร์ฟิส แสดงในสมการ (ข.1)

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

- เมื่อ  $C_d$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การจ่าย (Discharge coefficient)  
 $A_o$  คือ พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส,  $m^2$   
 $P$  คือ ความดันสถิตของของไหล,  $\frac{N}{m^2}$   
 $\rho$  คือ น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight),  $\frac{N}{m^3}$   
 $d_o$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรูออริฟิส  
 $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

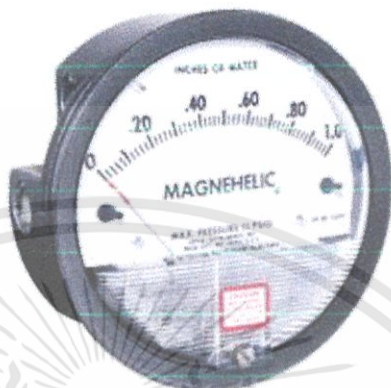




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค-1 เครื่องวัดความดันตกคร่อม

เครื่องวัดความดันตกคร่อม นั้นมีหลากหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมได้ตาม สถานะการณ์ที่แตกต่างกันออกไป



รูปที่ ค-1 Differential Pressure Gages

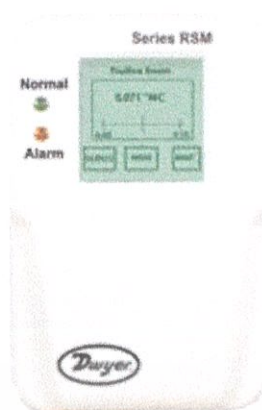


รูปที่ ค-2 Differential Pressure Switches-Digital

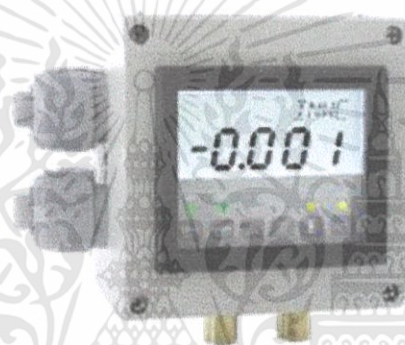


รูปที่ ค-3 Differential Pressure Switches analog

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-4 Differential Pressure monitor

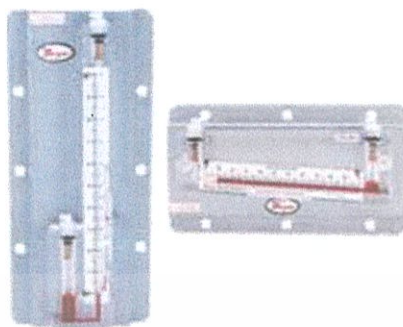


รูปที่ ค-5 Gage/Switches-Digital Manometers



รูปที่ ค-6 Digital Manometers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-7 Fluid Filled Manometers

ซึ่งรุ่นที่เหมาะสมแก่การใช้งานคือรุ่น Dwyer 475 Mark III ซึ่งช่วงการใช้งาน 0-10.00 IN W.C. (0-2.49 kPa) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันตกคร่อมระหว่างส่วนทดสอบ มีคุณสมบัติดังนี้

มีความแม่นยำในช่วง :  $\pm 0.5\%$  F.S., 60 to 78°F (15.6 to 25.6°C) ;  $\pm 1.5\%$  F.S. from 32 to 60°F and 78 to 104°F (0 to 15.6°C and 25.6 to 40°C).

ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด:  $\pm 0.1\%$  of full scale.

ช่วงอุณหภูมิที่วัดได้: 0 to 140°F (-17.8 to 60°C).

ความกว้างหน้าจอ: 0.42" (10.6 mm) 4-digit LCD.

แบตเตอรี่: 9 V alkaline battery, installed non-functional, user replaceable.

น้ำหนัก: 10.8 oz. (306 g).

ช่องเสียบในการวัด: Two barbed connections for use with 1/8" (3.18 mm) or 3/16" (4.76 mm) I.D. tubing. Two compression fittings for use with 1/8" (3.18 mm) I.D. x 1/4" (6.35 mm) O.D. tubing for 475-7-FM & 475-8-FM only.