

การเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อกลมด้วยการใส่วงแหวนตัวยูเอียง

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A CIRCULAR TUBE WITH
INCLINED U-RINGS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A CIRCULAR TUBE WITH
INCLINED U-RINGS



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

ปริญญาโทปีการศึกษา 2556
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อกลมด้วยการใส่วงแหวนตัวยูเอียง
HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A CIRCULAR TUBE WITH INCLINED U-RINGS

ผู้จัดทำ

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1. นาย ฌภัทร คำสาด | รหัสประจำตัว 53010421 |
| 2. นาย สิริภพ ทองรับแก้ว | รหัสประจำตัว 53011697 |
| 3. นาย โอภาส แสงกระจ่าง | รหัสประจำตัว 53011968 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อกลมด้วยการใส่วงแหวนตัวยูเอียง

นายณภัทร	คำสวด	53010421
นายสิริภพ	ทองรับแก้ว	53011697
นายโอภาส	แสงกระจ่าง	53011968
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการทดลอง เพื่อศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการติดตั้งวงแหวนตัวยูเอียงสำหรับช่วงการไหลปั่นป่วน โดยมีการทดลองกับอากาศในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5,300 ถึง 24,000 ในท่อที่มีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ศึกษาตัวแปรของวงแหวนตัวยูเอียงประกอบด้วยมุมปะทะการไหล (α) เท่ากับ 20° , 30° และ 45° อัตราส่วนการบล็อกการไหล ($BR = b/D$) เท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนระยะพิตช์ ($PR = P/D$) เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 การติดตั้งวงแหวนตัวยูเอียงจะส่งผลให้เกิดการไหลหมุนวนตามแนวยาวตลอดความยาวของท่อทดสอบ เพื่อพิจารณาค่าการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และสมรรถนะ นำเสนอในรูปของตัวเลขนัสเซลท์ (Nu) ตัวประกอบความเสียดทาน (f) และค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) ตามลำดับ โดยนำผลไปเปรียบเทียบกับท่อเปล่าที่ไม่มีการติดตั้งวงแหวนตัวยูเอียง จากการทดลองพบว่าการติดตั้งวงแหวนตัวยูเอียงสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้สูงถึง 1.99 – 3.91 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า โดยเฉพาะที่มุมปะทะการไหล 30° อัตราส่วนบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20 และ อัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 0.5 ให้ค่าตัวเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาอื่น และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.91 เท่าของท่อเปล่า ภายใต้ขอบเขตการศึกษาพบว่าค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดประมาณ 2.01 ของท่อที่มีการติดตั้งวงแหวนตัวยูเอียงทำมุมปะทะการไหล 20° อัตราส่วนบล็อกการไหลเท่ากับ 0.1 และอัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 0.5 ที่ตัวเลขเรย์โนลด์ 5300

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A CIRCULAR TUBE WITH INCLINED U-RINGS

Mr. Napat Khamsood 53010421
Mr. Sirapob Tongrubkhw 53011697
Mr. Opast Sangkrajang 53011968
Assoc.Prof.Dr.Pongjet Promvonge Adviser
Year 2556

ABSTRACT

The project presents an experimental study on turbulent flow friction and heat transfer enhancement in a circular tube fitted with inclined U-rings. The tested tube having a uniform heat-fluxed wall and the air flow rate in the test tube is presented in terms of Reynolds number from 5,300 to 24,000. The effects of inclined U-rings with three attack angles ($\alpha = 20^\circ, 30^\circ$ and 45°), three blockage ratios ($BR = b/D = 0.10, 0.15$ and 0.20) and three pitch ratios ($PR = P/D = 0.5, 1$ and 2) are investigated. The use of the U-rings inserted in the tube is expected to generate longitudinal vortex flows through the tested tube. The experimental results are compared with the smooth tube with no U-ring. The values of heat transfer, pressure loss and thermal performance are presented in terms of Nusselt number (Nu), friction factor (f) and thermal enhancement factor (TEF), respectively. The experimental results show that the heat transfer rates in the tube fitted with U-rings is around 1.99 to 3.91 times higher than the smooth tube, especially for the U-rings at $\alpha = 20^\circ$ $BR = 0.1$ and $PR = 0.5$ that provides the highest Nu of 3.91 times above the smooth tube. Over the range investigated, the maximum thermal enhancement factor of around 2.01 is found for using the U-rings with $\alpha = 20^\circ$, $BR = 0.1$ and $PR = 0.5$ at $Re=5300$

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะความกรุณาจาก รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน เนื่องด้วยอาจารย์สละเวลามากอดดูแลเอาใจใส่ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่างๆเสมอมา

ขอขอบคุณสำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำจากรุ่นพี่ที่ห้องปฏิบัติการ Thermo-Fluid & CFC ทุกท่าน โดยเฉพาะทีมงานวิจัยสายการประยุกต์ การถ่ายเทความร้อน ไม่ว่าจะเป็นพี่บ๊ิก พี่ไอค์ พี่แก้ว พี่บอย พี่ระ พี่เอ็ม และคุณวิฑาดา ที่คอยให้คำปรึกษาตลอดมา ขอขอบคุณคณะกรรมการคุมสอบปริญญานิพนธ์ที่กรุณาสละเวลามาให้คำแนะนำจนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ไปด้วยดี

และที่ขาดไม่ได้ต้องขอขอบคุณบิดา มารดาที่รักยิ่ง ที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถมามีเงินถึงจุดนี้ได้ ทั้งคำปรึกษา คำแนะนำ กำลังใจ ประสบการณ์ชีวิตต่างๆ ทำให้ข้าพเจ้ารับรู้และเข้าใจในการเติบโต เป็นบุคคลที่ดีต่อสังคม ข้าพเจ้าไม่สามารถจะเอ่ยคำขอบคุณได้หมดใจจากความกรุณาเมตตาและความรักของพวกท่านได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณที่ทุกท่านได้ช่วยเหลือข้าพเจ้าเสมอมาและขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายณภัทร คำสวด

นายสิริภพ ทองรับแก้ว

นายโอภาส แสงกระจ่าง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
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.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 แนวทางการศึกษาวิจัย.....	11
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	13
3.1 บทนำ.....	13
3.2 กลศาสตร์ของไหล.....	13
3.2.1 สภาวะการไหล.....	13
3.2.2 ความเร็วเฉลี่ย (mean velocity).....	15
3.2.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่.....	15
3.2.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับ ตัวเต็มที่.....	17
3.3 การถ่ายเทความร้อน.....	19
3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย.....	19
3.3.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่ (Fully developed conditions).....	20
3.4 การสมดุลของพลังงาน (Energy Balance).....	21
3.5 สหสัมพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบราบเรียบในท่อกลม.....	22
3.6 สหสัมพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม.....	24
3.7 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	26
4.1 ขอบเขตการออกแบบ	26
4.2 การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลอง	26
4.2.1 ท่อทางเข้าชุดทดลอง.....	26
4.2.2 เครื่องปั๊มลม.....	27
4.3 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง.....	27
4.3.1 แหล่งจ่ายอากาศ	27
4.3.2 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ.....	28
4.3.3 ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม.....	29
4.3.4 ถังพักลม (Settling tank)	30
4.3.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	31
4.3.6 เครื่องวัดความดันตกคร่อม	31
4.3.7 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ.....	32
4.4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง.....	32
4.4.1 อุปกรณ์ชุดทดลอง.....	32
4.4.2 อุปกรณ์ติดตั้งแผ่นกั้นที่ใช้ทดลอง	33
4.5 วิธีการทดลอง.....	34
4.6 การวิเคราะห์ข้อมูล	35
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	37
5.1 บทนำ.....	37
5.2 ผลการทดลองกับผนังเรียบ	37
5.2.1 ค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number)	37
5.2.2 ค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction Factor).....	38
5.3 ผลการทดลองด้วยการใส่วงแหวนตัวยูเอียง.....	39
5.3.1 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลที่อัตราส่วนระยะพิตซ์เดียวกัน.....	39
5.3.2 อิทธิพลของอัตราส่วนการบล็อกการไหลที่มุมปะทะการไหลเดียวกัน.....	42
5.3.3 อิทธิพลของอัตราส่วนระยะพิตซ์ที่มุมปะทะการไหลเดียวกัน	46
5.3.4 เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมของท่อที่ ใส่วงแหวนตัวยูเอียงกับท่อผนังเรียบ	49
5.3.5 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Thermal enhancement factor)...	54
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	58
6.1 สรุปผลการทดลอง	58
6.2 ข้อเสนอแนะ	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	60
ภาคผนวก ก.....	63
ภาคผนวก ข.....	65



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ 64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **VII** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบครีบบนทอสีเหลี่ยมของ Ahn	5
2.2 รูปแบบครีบบนทอที่มีร่อง (Rib-grooved) ของ Jaurker et al.	6
2.3 ประเภทใบปิดและการเว้นระยะห่างของ Smith Eiamsa-ard.....	7
2.4 ขดลวดของ Alberto Garcí a.....	7
2.5 ชุดทดลองติดตั้งหัวฉีดรูปตัววี ของ Pongjet Promvongse	8
2.6 (ก) ลักษณะการไหลแบบต่างๆบนพื้นผิวที่มีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันกับระยะห่างระหว่างยอด ผิวขรุขระ และ (ข) ลักษณะการไหลแบบต่างๆ บนพื้นผิวที่มีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชัน กับความสูงของผิวขรุขระของ Varun et al.....	8
2.7 ลักษณะใบปิดเกลียวกับวงแหวนทรงกรวย ของ Promvongse and Eiamsa-ard	9
2.8 ส่วนทดสอบการจับวางครีบบนทอตรงกันและเอียงกันของ Promvongse and Thianpong	9
2.9 ครีบบนทอรูปตัววีมุม 45° ของ อำไพจิตร	10
2.10 แสดงอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนวงกลมที่ Diameter ratios ต่างๆ	11
3.1 การก่อตัวของชั้นขอบเขตการไหลของการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม.....	14
3.2 สมดุลแรงบนอิลิเมนต์ dx สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ก่อตัวเต็มที่ในท่อกลม.....	16
3.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่ในท่อกลม.....	18
3.4 การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม	19
3.5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ	21
3.6 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัวยูเอียง	25
4.1 พัดลมแรงดันสูง (High-pressure blower).....	28
4.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter).....	28
4.3 แผ่นออริฟิส	29
4.4 เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer).....	29
4.5 ชุดทดลองที่ใช้ทดลอง	30
4.6 อุปกรณ์ติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัวยูเอียงที่ใช้ทดลอง	30
4.7 ถังพักลม (Settling tank)	30
4.8 เครื่องเก็บข้อมูล.....	31
4.9 เทอร์โมคัปเปิล.....	31
4.10 เครื่องวัดความดันตกคร่อม, Dwyer 475 Mark III Digital Manometer	32
4.11 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (Vane-type Anemometer), TESTO 445.....	32
4.12 แผนผังของชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม	33
4.13 อุปกรณ์ติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัวยูเอียงที่ใช้ทดลอง.....	34
5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีที่มีผนังเรียบโดย เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนจากการทดลองกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter.....	38
5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีที่มีผนัง เรียบโดยเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมจากการทดลองกับสหสัมพันธ์ของ Blasius.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และห้ามอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนี้สเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียง ที่มีมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วน ระยะพิตซ์เท่ากับ 0.5	39
5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนี้สเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียง ที่มีมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วน ระยะพิตซ์เท่ากับ 1.0	40
5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนี้สเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียง ที่มีมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วน ระยะพิตซ์เท่ากับ 2.0	40
5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิตซ์เท่ากับ 0.5	41
5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิตซ์เท่ากับ 1.0	41
5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิตซ์เท่ากับ 2.0	42
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนี้สเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียง ที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตซ์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20°	43
5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนี้สเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียง ที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตซ์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30°	43
5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนี้สเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียง ที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตซ์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45°	44
5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตซ์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20°	44
5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตซ์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30°	45

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่ วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดย พิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45°	45
5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียง ที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์และมุมปะทะการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนการบล็อก การไหลเท่ากับ 0.10	46
5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียง ที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์และมุมปะทะการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนการบล็อก การไหลเท่ากับ 0.15.....	47
5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียง ที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์และมุมปะทะการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนการบล็อก การไหลเท่ากับ 0.20.....	47
5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่ วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์และมุมปะทะการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่ อัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10.....	48
5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่ วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์และมุมปะทะการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่ อัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15.....	48
5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่ วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์และมุมปะทะการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่ อัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20.....	49
5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขนัสเซลท์ต่อตัวเลขนัสเซลท์ของท่อผนังเรียบ กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหล และอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20°	50
5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขนัสเซลท์ต่อตัวเลขนัสเซลท์ของท่อผนังเรียบ กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหล และอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30°	51
5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขนัสเซลท์ต่อตัวเลขนัสเซลท์ของท่อผนังเรียบ กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหล และอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45°	51
5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานต่อตัวประกอบความ เสียดทานของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วน การบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20°	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายต่อตัวประกอบความเสียหายของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30°	53
5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายต่อตัวประกอบความเสียหายของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45°	54
5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20°	55
5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30°	55
5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45°	56
5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีมุมปะทะการไหล อัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ	57
ข-1 Standard orifice plate	66
ข-2 โครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิส	66
ข-3 การไหลผ่านแผ่นของออริฟิส	67
ข-4 ออริฟิสแบบต่างๆ	67

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ตัวอักษรลาติน

A	พื้นที่การพาความร้อนของท่อ, m^2
A_c	พื้นที่หน้าตัด, m^2
A_s	พื้นที่ผิว, m^2
e	ความสูงปีก, m
BR	อัตราส่วนการบล็อกการไหล (e/H)
C_f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน หรือ ตัวประกอบเสียดทานของแผ่นผนัง
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่, $J/kg.K$
C_v	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหลที่ปริมาตรคงที่, $J/kg.K$
C_1	ค่าคงที่
C_2	ค่าคงที่
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m
p	ระยะห่างระหว่างแต่ละครีป, m
f	ตัวประกอบเสียดทาน
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย, W/m^2K
I	กระแสไฟฟ้า, A
J	ตัวประกอบการถ่ายเทความร้อนของคูลเบริน
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m^2K
L	ความยาวของส่วนทดสอบ, m
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
Nu	เลขนัสเซิลท์
\overline{Nu}	เลขนัสเซิลท์เฉลี่ย
n	ค่าคงที่
P	ระยะพิตช์ตามยาว, m
P_e	ความยาวเส้นรอบรูป, m
P_t	ระยะพิตช์ตามขวาง, m
Pr	เลขพรานส์
PR	อัตราส่วนระยะพิตช์ (P/D)
p	ความดันของไหล, N/m^2
Δp	ความดันตกคร่อม, N/m^2
Q	ค่าการถ่ายเทความร้อน, W
q_{conv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด, W
q_s''	ฟลักซ์ความที่ผิว, W/m^2
R	ค่าคงที่ของก๊าซ, $J/kg.K$
Re	เลขเรย์โนลด์ (UD/v)

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

r	รัศมีที่ตำแหน่งใดๆ, m
r_0	รัศมีท่อกลม, m
S_f	เลขสแตนต์
T	อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ, °C
T_b	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, °C
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ, °C
$T_{m,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางเข้า, °C
$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางออก, °C
T_s	อุณหภูมิเฉลี่ยผิวท่อ, °C
TEF	ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน
\overline{TEF}	ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ย
t	ความหนาปีก, m
U	ความเร็วเฉลี่ย, m/s
u	ความเร็วตามแนวแกน x, m/s
u_m	ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ, m/s
V	ความต่างศักย์ไฟฟ้า, V
\dot{V}	อัตราการไหลเชิงปริมาตร, m ³ /s
\bar{V}	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s
v	ปริมาตรจำเพาะ, m ² /s
v_r	ความเร็วตามแนวแกน r, m/s
\dot{W}_{in}	การจ่ายกำลังให้พัดลม, J/s
x	ความยาวที่ตำแหน่งใดๆ, m
x_{fd}	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัวเต็ม, m
$x_{fd,h}$	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัว, m
$x_{fd,t}$	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัวเต็มที่ของความร้อน, m

สัญลักษณ์ตัวอักษรกรีก

ρ	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m ³
ν	ความหนืดเชิงจลน์, m ² /s
α	มุมปะทะของปีก (°, degree)
μ	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล, N.s/m ²
μ_s	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหลที่ผิว, N.s/m ²
τ_r	ความเค้นเฉือนในแนวรัศมี, N/m ²

รายการค้ำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

τ_s ความเค้นเฉือนบนผิว, N/m^2

สัญลักษณ์ตัวห้อย

0 ผั่งเรียบ

i เข้า

o ออก

pp กำลังขับ



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานถือเป็นทรัพยากรที่สำคัญในกระบวนการต่างๆ ที่ผ่านมาจากจนถึงปัจจุบันนี้ทั้งหลายหน่วยงานภาครัฐและเอกชนทั่วโลกต่างตระหนักถึงการประหยัดพลังงานและการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด จึงได้มีการคิดค้นวิทยาการเทคโนโลยีใหม่ๆ ในการรักษาพลังงานไว้ให้มากที่สุด หรือแม้กระทั่งคิดค้นวิจัยหาแหล่งพลังงานใหม่ แต่ทั้งนี้ความต้องการในการใช้พลังงานก็มากขึ้นตามไปด้วยเนื่องมาจากการแข่งขันกันในเรื่องธุรกิจหรือมาจากจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม ฉะนั้นหากหน่วยงานมีความรู้ในการใช้เทคโนโลยีอย่างไม่เหมาะสมแล้ว ปัญหาดังกล่าวก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถือเป็นเทคโนโลยีที่สามารถช่วยในการประหยัดรักษาพลังงานได้อย่างหนึ่ง ซึ่งปัจจุบันได้ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม ตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ ด้วยเหตุผลที่ต้องการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้นเพื่อให้ได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดเหมาะสมและมีราคาที่ถูกลงซึ่งได้มาประยุกต์มาใช้ในเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ต่างๆ เช่น เครื่องอบแห้ง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เตารีด เครื่องทำความเย็น เครื่องยนต์ เป็นต้น การออกแบบอุปกรณ์หรือระบบที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีต้องสามารถทำงานได้ตามความต้องการสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนและแลกเปลี่ยนความร้อนสูง ขนาดกะทัดรัด ราคาถูกเหมาะสมอายุการใช้งานนาน บำรุงรักษาง่าย ความปลอดภัยสูง ทั้งนี้ทั้งนั้นก็เพื่อลดการใช้พลังงานให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรือการพัฒนาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นเรื่องท้าทายในปัจจุบัน

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 Active techniques เป็นการนำเอาแหล่งพลังงานภายนอกเข้ามากระทำ ซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นของผิวท่อทำให้ของไหลภายในท่อเกิดการสั่น ผลของการสั่นสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้า เป็นต้น กลุ่มที่ 2 Passive techniques เป็นการออกแบบลักษณะผิวของท่อให้มีลักษณะพิเศษต่างจากท่อผิวเรียบทำให้การไหลของของไหลเปลี่ยนแปลงไปสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่มีพลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่นิยมทำกันมากคือวิธี Passive techniques โดยการติดครีปเพื่อให้เกิดการไหลแบบหมุนวน ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นได้ดีมาก แต่ก็ส่งผลให้ความเสียดทานภายในท่อเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดความดันตกคร่อมภายในท่อด้วย ทำให้มีข้อจำกัดในการติดตั้งแผ่นกันครีป จึงจะต้องออกแบบแผ่นกันให้ดีเพื่อลดความเสียดทานให้มากที่สุด แต่ก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนในระดับที่ดีอีกด้วย ดังนั้นเราจึงทำการทดสอบโดยการใส่แผ่นวงแหวนตัวยูเอียงภายในท่อกลม เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัวยูเอียง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในท่อกลมที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ มุมปะทะ ระยะความสูง และระยะห่างของวงแหวนตัวยูเอียงที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน
- 1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของท่อที่มีการใส่วงแหวนรูปตัวยูเอียงกับท่อผนังเรียบ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การใส่วงแหวนตัวยูเอียงในท่อกลม ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน เป็นผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน และลดค่าตัวประกอบความเสียหาย ทำให้เพิ่มค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.4.1 ทดลองกับอากาศในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5,300 ถึง 24,000
- 1.4.2 ทดลองในท่อที่มีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่
- 1.4.3 วงแหวนรูปตัวยูเอียงทำมุมปะทะการไหลที่มุม 20°, 30° และ 45° โดยมีค่าอัตราส่วนการบล็อกรการไหล (Blockage Ratio, b/D) เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 และมีอัตราส่วนระยะห่างต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (Pitch Ratio, P/D) เท่ากับ 0.5, 1 และ 2
- 1.4.4 พิจารณาท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษาการพาความร้อน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะความร้อน
- 1.5.2 กำหนดรูปแบบและเงื่อนไขในการทดลอง
- 1.5.3 ทำแผ่นกั้นรูปตัวยูเอียงในเงื่อนไข มุมปะทะการไหล (α) เท่ากับ 20°, 30° และ 45° อัตราส่วนการบล็อกรการไหล ($BR = b/D$) เท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.2 และอัตราส่วนระยะพิตช์ ($PR = P/D$) เท่ากับ 0.5, 1 และ 2
- 1.5.4 ทำการทดลองโดยใส่แผ่นกั้นรูปตัวยูเอียงในท่อกลม และนำค่าที่ได้ไปคำนวณ
- 1.5.5 วิเคราะห์ค่าที่ได้จากการทดลอง นำไปเทียบกับท่อเปล่า
- 1.5.6 สรุปผลการทดลองว่าผลที่ได้จะส่งผลต่อการทดลองในอนาคตต่อไปอย่างไร

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อกลม
- 1.6.2 พัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น
- 1.6.3 นำความรู้หลักการการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไปประยุกต์และพัฒนาในกระบวนการต่างๆ

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงความเป็นมาและการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมด้วยการติดตั้งแผ่นกัน การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมในกระบวนการต่างๆมาก ดังนั้นจึงมีนักวิจัยจำนวนมากที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามวิธีต่าง ๆ เพื่อจะได้ช่วยลดขนาดและต้นทุนการผลิตให้น้อยลงไปกว่าที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้ ดังนั้นการหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิผลในกระบวนการผลิตและยังเป็นการลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตได้อีกด้วย โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีดังนี้

R.M.Manglik and A.E. Bergles [2] ได้ทำการศึกษาคาร์ไฮลแบบราบเรียบในท่อครึ่งวงกลมของ UWT ซึ่งบทความนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์เชิงตัวเลข สำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่ของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นในท่อที่ใส่เกลียวเข้าไป เช่นเดียวกับผลของการถ่ายเทความร้อนของท่อที่มีครีป

Han et al. [3] ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงครีปรูปตัววีมุม 45° และครีปรูปตัววีมุม 60° แบบแรก แนวครีปรูปตัววีมุม 45° และแนวครีปรูปตัววีมุม 60° มีทิศทางเดียวกับการไหล และแบบที่สอง แนวครีปรูปตัววีมุม 45° และแนวครีปรูปตัววีมุม 60° มีทิศทางตรงข้ามกับการไหล ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ 15,000 ถึง 90,000 พบว่า แนวครีปรูปตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมมากกว่าแนวครีปรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหล โดยครีปรูปตัววีมุม 60° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมมากกว่าครีปรูปตัววีมุม 45° ส่วนในด้านการเพิ่มสมรรถนะความร้อนครีปรูปตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลให้ค่ามากกว่าครีปรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหล โดยครีปรูปตัววีมุม 45° มีค่าการเพิ่มสมรรถนะความร้อนมากกว่าครีปรูปตัววีมุม 60°

Liou et al. [4, 5] ทำการทดลองครีปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ครีปสามเหลี่ยม และครีปครึ่งวงกลม พบว่า ครีปสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อนดีที่สุดในครีปทั้งหมดที่ทดลอง ดังนั้นเพื่อให้เกิดการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อด้วยครีปบาง มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงจะนำเสนอทั้งการคำนวณเชิงตัวเลขและผลการทดลอง สำหรับการไหลแบบราบเรียบ 3 มิติ โดยพิจารณาลักษณะการไหลเป็นคาบ ในท่อที่ติดครีปบางลักษณะต่าง ๆ โดยศึกษาถึงผลของอัตราส่วนการปิดกั้นของครีปและมุมปะทะ ที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มสมรรถนะความร้อน

Han et al. [6] ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีครีบริบรูปตัววีและครีบริบรูปสามเหลี่ยม เพื่อให้เกิดการไหลปั่นป่วน พบว่า ครีบริบรูปสามเหลี่ยมให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่ดีที่สุด

Zhang et al. [7] ทำการศึกษาอิทธิพลของร่องระหว่างครีบริบในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มี Aspect Ratio, AR = 1-10 ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 10,000-50,000$ และพบว่า ร่องระหว่างครีบริบให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าผนังครีบริบ แต่มีค่าความดันตกคร่อมเท่ากัน

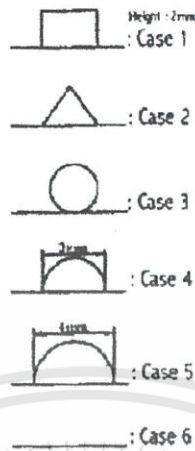
Taslim et al. [8] รายงานค่าเลขนัสเซิลท์ที่จุดใด ๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบเนื่องจากมุมครีบริบ รูปทรงครีบริบรูปตัววี และความไม่ต่อเนื่องครีบริบ (แนวครีบริบรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่น ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อนพบว่า ค่าตัวเลขนัสเซิลท์มากที่สุดเมื่อแนวครีบริบรูปตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหล

S.K.Agarwal and M.Raj Rao [9] ได้ทำการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลของของไหลชนิด ในท่อกลมที่สอดใส่ไบบิตเอาไว้ Isothermal และ nonisothermal friction factor และค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของ UWT ความร้อนและความเย็นของ Servotherm oil ($Pr=195-375$) จากการวิจัยอธิบายได้ว่า การไหลในท่อกลม ($Re=70-4000$) ที่มีการใส่ไบบิตเข้าไป ($y=2.41-4.84$) ค่าแรงเสียดทานได้ 3.13-9.71 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ได้ 2.28-5.35 และ 1.21-3.70 ซึ่งจากกระบวนการนี้ส่งเสริมให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นการไหลแบบหมุนวนทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น

Gentry and Jacobi [10] การออกแบบปีกเพื่อให้เกิดการหมุนวนของของไหล ซึ่งเป็นการเพิ่มระดับการปั่นป่วน และการพาความร้อนดีขึ้นก่อให้เกิดการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่ดีขึ้น ได้นำเสนอการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยการเพิ่มการหมุนวนที่หัวมุมของแผ่นเรียบ โดยค่าเฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น 50-60% โดยที่ผิวของแผ่นเรียบจะใช้ปีกแบบ เดลต้า ซึ่งถือว่าดีกว่าปีกแบบสามเหลี่ยมหน้าจั่วเพราะเพิ่มอัตราส่วนการไหลและมุมปะทะ

Ahn [11] ทำการศึกษาผลกระทบของครีบริบรูปแบบต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยม โดยทำการศึกษารูปทรงครีบริบ 5 ชนิด ได้แก่ ครีบริบสี่เหลี่ยม ครีบริบสามเหลี่ยม ครีบริบวงกลม ครีบริบครึ่งวงกลมทรงต่ำ และครีบริบครึ่งวงกลมทรงสูง โดยทำการศึกษาที่ความสูงครีบริบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ 0.0476 อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงครีบริบ (P/e) เท่ากับ 8 และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ 2.33 และรูปแบบครีบริบดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากการทดลองพบว่า แผ่นครีบริบสามเหลี่ยมมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ตามด้วยครีบริบสี่เหลี่ยม ส่วนครีบริบวงกลมและครึ่งวงกลมมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน โดยในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 10,000$ แผ่นครีบริบสามเหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นเรียบ 3 เท่า ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 20,000$ จะมี

แนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมพบว่าแผ่นครีบบสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมมากที่สุด ตามด้วยแผ่นครีบบสี่เหลี่ยม



รูปที่ 2.1 รูปแบบครีบบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Ahn

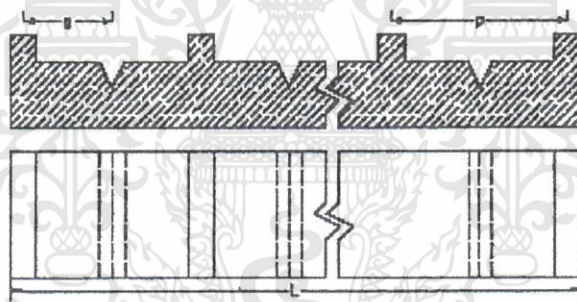
S.K.Saha, A,Dutta, S.K.Dhal [12] ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะแรงเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการไหลแบบราบเรียบในท่อที่ติดตั้งใบพัด การทดลองในท่อที่มีใบพัดอยู่เป็นช่วงๆ ทำให้การถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อมลดลงอย่างมาก การหมุนวนแบบราบเรียบของของไหลชนิด ที่มีตัวเลข Prandtt Number ช่วงปานกลาง การหมุนวนเกิดขึ้นจากการสอดใส่ใบพัดใบเดียวใส่เข้าไปในท่อและเชื่อมใบพัดด้วยแท่งกลมขนาดเล็ก ความกว้างของใบพัดและเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทรงกลมที่ใช้แตกต่างกัน ผู้วิจัยยังศึกษาผลของการใช้มุมในการบิดมากกว่าศูนย์ ระหว่างใบพัดที่ต่อเชื่อมกัน ความร้อนและisothermal การทดสอบการถ่ายเทความร้อน ทำโดยการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าตามแกนและตามเส้นรอบวง เครื่องให้ความร้อนแบบ Wall heat flux ความถี่แบบ (UHF) มีการหาปัจจัยในการทดลอง เช่น ค่า Re, Pr, อัตราการบิด, อัตราช่องว่างระหว่างใบพัด, ความกว้างของใบพัด, เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งวงกลมและลักษณะของมุม, การทำให้ใบพัดติดกับท่อทรงกลม แทนที่จะเชื่อมใบพัดเข้าด้วยกันโดยแท่งทรงกลมขนาดเล็ก ให้ผลดีกว่าเมื่อมองในแง่เทอร์โมไฮดรอลิก การลดความกว้างของใบพัดที่ใส่เข้าไปในท่อ ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง มุมที่มากกว่าศูนย์ ไม่ได้ทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น แต่ทำให้การทำใบพัดยากมากขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อความร้อน แรงเสียดทาน ของการหมุนวนน้อยกว่าการไหลแบบตรงในท่อธรรมดา

S.Ray, AW.Date [13] ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะแรงเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งใบพัด ในบทความนี้กล่าวถึงวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขซึ่งทำนายลักษณะการไหลแบบราบเรียบ เช่นเดียวกันกับการไหลแบบปั่นป่วน และการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งใบพัด การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนทำนายภายใต้ค่าคงที่ของ Heat flux การไหล และการถ่ายเทความร้อน เป็นการไหลแบบปรับตัวตามแนวแกนซึ่งเกี่ยวพันกันระหว่างค่าแรงเสียดทานกับค่านัสเซลันัมเบอร์

Jaurker et al. [14] ศึกษาความสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยมชนิดผิวครีบบ-ร่อง โดยมีขอบเขตการศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

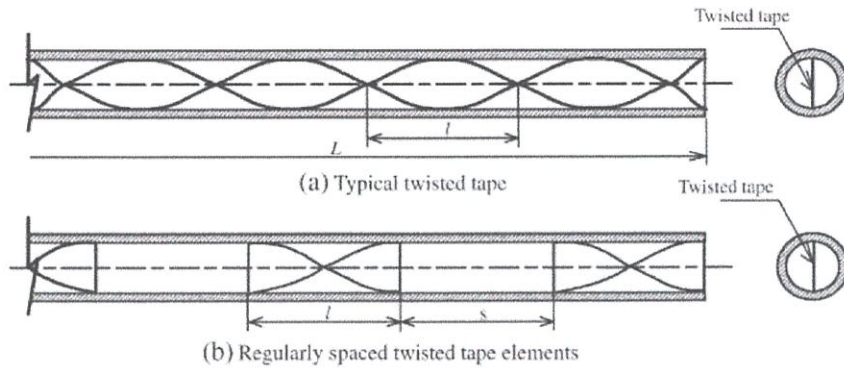
$Re = 3,000-21,000$ ความสูงครีบอกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ 0.0181-0.0363 อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงครีบอก (P/e) เท่ากับ 4.5-10.0 และระยะร่องต่อระยะพิทช์ (g/P) เท่ากับ 0.3-0.7 โดยครีบอกต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.2

จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผ่นครีบอก-ร่อง จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผ่นครีบอก-ร่อง จะมีค่ามากกว่าแผ่นครีบอกอย่างเดียว และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงครีบอก (P/e) มีค่าลดลง และมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงครีบอก เท่ากับ 6 เมื่อระยะร่องต่อระยะพิทช์ (g/P) มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเลขนัสเซิลท์มีค่าสูงสุดเมื่อระยะร่องต่อระยะพิทช์เท่ากับ 0.4 และมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ เมื่อระยะร่องต่อระยะพิทช์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความสูงครีบอกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงครีบอกมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงครีบอกเท่ากับ 6 และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงครีบอกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะร่องต่อระยะพิทช์มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าสูงสุดเมื่อระยะร่องต่อระยะพิทช์เท่ากับ 0.4 และมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ เมื่อระยะร่องต่อระยะพิทช์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความสูงครีบอกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



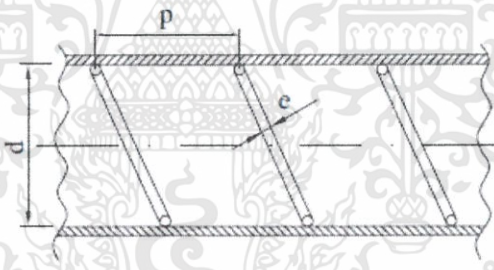
รูปที่ 2.2 รูปแบบครีบอกที่มีร่อง (Rib-grooved) ของ Jaurker et al.

Smith Eiamsa-ard et al. [15] การทดลองวิจัยการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทาน การไหลในท่อกลมที่ติดตั้งใบพัดระยะห่างสม่ำเสมอ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 25.8 มิลลิเมตร ภายนอกท่อเท่ากับ 50.6 มิลลิเมตร ใช้อัตราส่วนความยาวของใบพัด เท่ากับ 6.0 และ 8.0 และอัตราส่วนช่องว่าง เท่ากับ 1.0, 2.0 และ 3.0 ผลที่ได้รับจากการใส่ใบพัดในท่อคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความยาวและอัตราส่วนของช่องว่าง และค่าความเสียดทานก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน



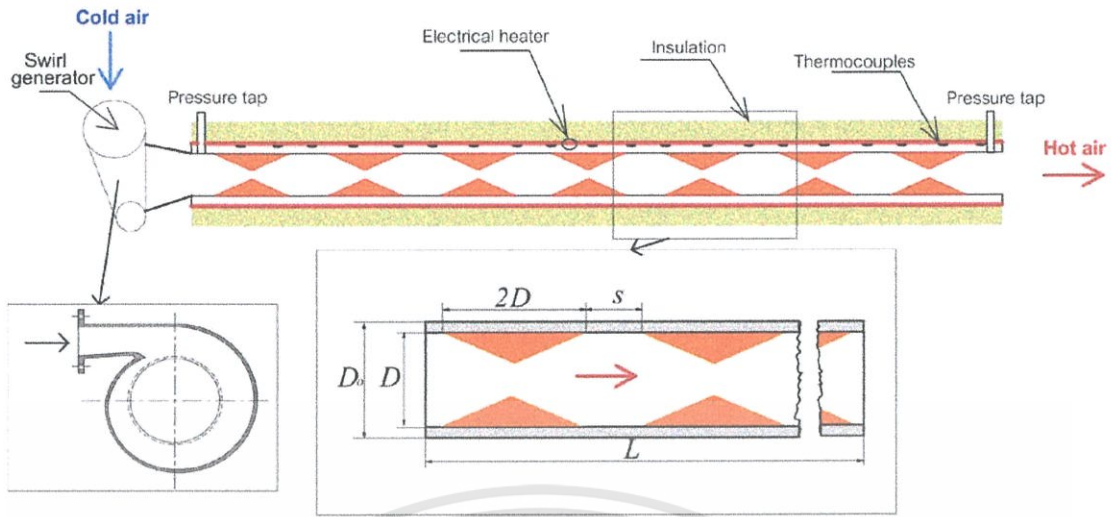
รูปที่ 2.3 ประเภทใบบิดและการเว้นระยะว่างของ Smith Eiamsa-ard

Alberto Garcí'a et al. [16] ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม โดยใช้ขดลวด โดยใช้ช่วงเลขเรย์โนลด์สอยู่ระหว่าง 80 ถึง 90,000 อัตราส่วนระยะพิตช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.17 ถึง 2.68 และอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.10 ผลแสดงให้เห็นว่าในการไหลแบบปั่นป่วนขดลวดลดความดันในท่อลง 9 เท่า และการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 4 เท่าเทียบกับท่อเปล่า และในการไหลแบบราบเรียบขดลวดสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มากถึง 200% โดยให้กำลังของปั๊มคงที่



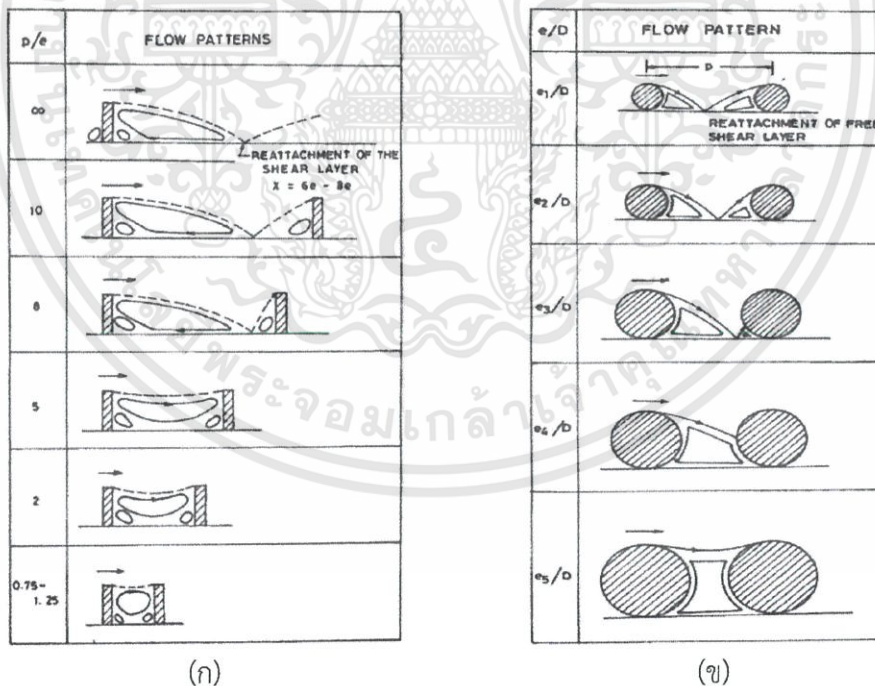
รูปที่ 2.4 ขดลวดของ Alberto Garcí'a

Pongjet Promvong et al. [17] การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยการใช้นวัตกรรมตัววี ติดตั้งโดยมีอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 2.0, 4.0 และ 7.0 กำหนดขอบเขตเลขเรย์โนลด์สอยู่ระหว่าง 8,000 ถึง 18,000



รูปที่ 2.5 ชุดทดลองติดตั้งหัวฉีดรูปตัววี ของ Pongjet Promvong

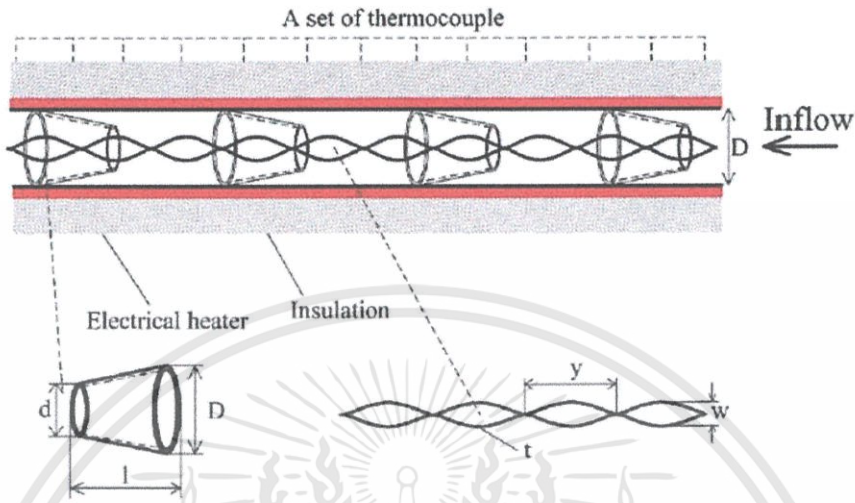
Varun et al. [18] ได้สรุปและเรียบเรียงเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อด้วยการจำลองความขรุขระบนผิวท่อ ประกอบด้วยรูปทรงต่าง ๆ ของส่วนที่ขรุขระ แสดงในรูปที่ 2.6 พร้อมทั้งเสนอการวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน และความเสียดทานภายในท่ออากาศร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.6 (ก) ลักษณะการไหลแบบต่าง ๆ บนพื้นผิวที่มีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันกับระยะห่างระหว่างยอดผิวขรุขระ และ (ข) ลักษณะการไหลแบบต่าง ๆ บนพื้นผิวที่มีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันกับความสูงของผิวขรุขระของ Varun et al.

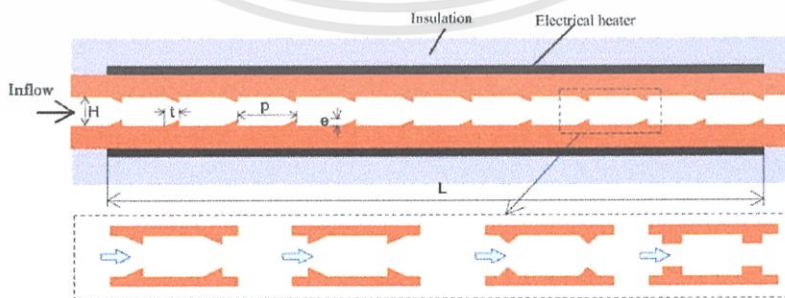
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Promvong and Eiamsa-ard [19] ได้ศึกษาผลการใช้แผ่นรูปทรงกรวยร่วมกับไบบิตโดยการใช้แผ่นไบบิตที่ค่า twist ratios 3.75 และ 7.5 ติดตั้งพร้อมก็บวงแหวนทรงกรวย พบว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 10% จากการใช้แผ่นรูปทรงกรวยเพียงอย่างเดียว ตัวอย่างดังรูป



รูปที่ 2.7 ลักษณะไบบิตเกลียวกับวงแหวนทรงกรวย ของ Promvong and Eiamsa-ard

Promvong and Thianpong [20] นอกเหนือจากบทความนี้ ในการศึกษาส่วนใหญ่จะให้ความสนใจช่องขนานแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรืออัตราส่วนของรูปทรงของช่องขนานต่ำ ๆ โดยรูปร่างของครีปเป็นแบบ ครึ่งวงกลม วงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือเขมเพอร์ และมุมของครีปเป็น 30° , 45° และ 60° สำหรับอัตราส่วน e/H ระหว่าง 0.05 และ 0.15 และอัตราส่วน P/e อยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 20 การหาความเหมาะสมรูปร่างของครีปของความแตกต่างหน้าตัดสามเหลี่ยมพบไม่บ่อยในรายงาน ด้วยเหตุนี้จุดมุ่งหมายสำคัญของการนำเสนอผลงานเพื่อเพิ่มเติมของข้อมูลการทดลองครีปรูปสามเหลี่ยมต่าง ๆ (สามเหลี่ยมหน้าจั่วและสามเหลี่ยมมุมฉาก) โดยในทำนองเดียวกัน อัตราส่วน e/H เพิ่มขึ้นเป็น 0.3 ผลลัพธ์เหล่านี้ช่วยการออกแบบที่ดีขึ้นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการทดสอบจะใช้อากาศในการทดสอบ โดยการไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่ช่วงเลขเรย์โนลด์อยู่ในตั้งแต่ 5,000 ถึง 16,000 ส่วนทดสอบ แสดงในรูปที่ 2.8

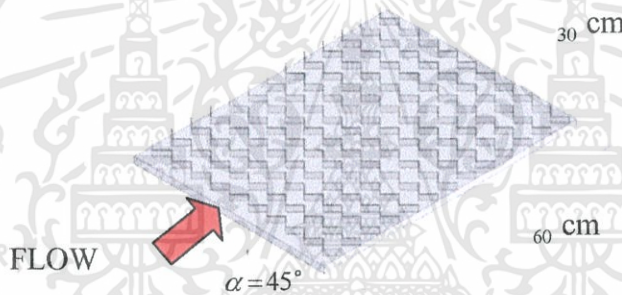


รูปที่ 2.8 ส่วนทดสอบการจัดวางครีปแบบตรงกันและเอียงกันของ Promvong and Thianpong

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sripattanapipat and Promvonge [21] แสดงการวิเคราะห์เชิงตัวเลขการถ่ายเทความร้อนราบเรียบ 2 มิติ ในช่องขนานที่ติดแผ่นกันรูปเพชรที่ผนังบนและล่างแนวเฉียง โดยคิดลักษณะการไหลเป็นคาบ โดยใช้เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผนังคงที่ เลขเรย์โนลด์ในช่วง 100 ถึง 600 พบว่าเมื่อลดมุมที่ยอดรูปเพชรจะทำให้ค่าเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น และยังพบว่าทุกค่าเลขเรย์โนลด์ที่ใช้มุมยอดเพชรที่ 5° และ 10° ให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูงกว่ามุมยอดเพชรที่ 0° (แผ่นกันแบน)

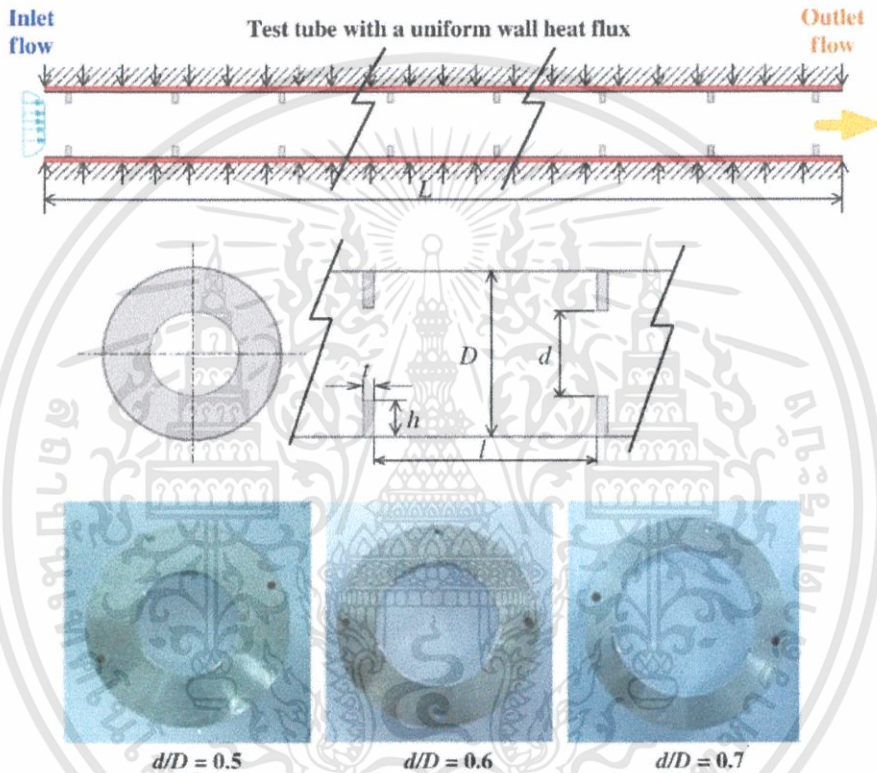
อำเภอไฟจิตร [1] ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อแผ่นขนานที่มีครีบหยากรูปตัววีทำมุมปะทะกับของไหล 45° อัตราส่วนความสูงครีบต่อความสูงช่องขนาน $y/H = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ และ 0.25 อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงช่องขนาน $PR = 1, 2$ และ 3 โดยติดตั้งครีบที่ผิวบนเพียงด้านเดียว และติดตั้งครีบที่ผิวบนและผิวล่าง จัดวางครีบแบบเอียงกันและตรงกัน โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวเป็นแบบพลิกซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ที่ท่อแผ่นขนานด้านบน และใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 ถึง 23,000 แผ่นทดสอบ แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ครีบหยากรูปตัววีมุม 45° ของ อำเภอไฟจิตร

ผลการทดลองพบว่า การติดตั้งหยากรูปตัววีที่ผิวบนและผิวล่างจัดวางครีบแบบตรงกัน ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดท่อแผ่นขนานที่มีการติดตั้งครีบที่ผิวบนและผิวล่างจัดวางครีบแบบเอียงกัน และติดตั้งครีบที่ผิวบนเพียงอย่างเดียว โดยที่ค่า $y/H = 0.25$ และ $PR = 1$ มีค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 10.63 เท่า และค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 68.67 เท่า ตามด้วย การติดตั้งครีบที่ผิวบนและผิวล่างจัดวางครีบแบบเอียงกัน มีค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 9.76 เท่า และค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 60.97 เท่า และการติดตั้งครีบที่ผิวบนเพียงอย่างเดียว มีค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 7.59 เท่า และค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 46.47 เท่า ซึ่งส่งผลให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบตามลำดับดังนี้ 2.61, 2.49 และ 2.12 เท่า อย่างไรก็ตามการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่สูงที่สุด คือ ชุดท่อแผ่นขนานที่ติดตั้งครีบหยากรูปตัววีโดยติดตั้งที่ผิวบนและผิวล่างแบบวางครีบตรงกัน ที่ $y/H = 0.10, PR = 1$ มีการเพิ่มสมรรถนะความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อแผ่นขนานผนังเรียบ 2.91 เท่าที่กำลังขับเคลื่อนของไหลเท่ากัน

V. Kongkaietpaiboon et al. [22] ได้ศึกษาและทดลองการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมด้วยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนรูปทรงวงแหวนกลม ซึ่งได้ทดลองในค่า Diameter ratios ($DR=d/D=0.5, 0.6$ และ 0.7) และที่ Pitch ratios ($PR= p/D=6, 8$ และ 12) ในสภาวะที่ความร้อนพลั๊กซ์ที่ผิวคงที่และใช้ค่า Reynolds number ที่ค่า 4,000 ถึง 20,000 พบว่ากรณีที่มีการติดตั้งแผ่นวงแหวน เพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ 57% ถึง 195% เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่า นอกจากนี้พบว่าที่อัตราส่วนระยะระหว่างแผ่นและอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าน้อย จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า แต่ในขณะเดียวกันจะให้ค่าการสูญเสียความดันที่มากกว่าเช่นกัน



รูปที่ 2.10 แสดงอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนวงกลมที่ Diameter ratios ต่างๆ

2.2 แนวทางการศึกษาวิจัย

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่การทดลองจะมุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงของมุมปะทะ ความสูงของครีป ระยะห่างของครีป และรูปทรงของครีป ซึ่งส่งผลต่อลักษณะการไหลของของไหล การสูญเสียความดันและแรงเสียดทาน ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำแนวคิดต่างๆมาประยุกต์ครีปมาติดตั้งภายในท่อกลมซึ่งเป็นวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมด้วยครีปวงแหวนด้วยเอียง เพื่อเป็นความรู้และแนวทางใหม่ๆในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและมีขนาดกะทัดรัดราคาเหมาะสม และเพื่อศึกษาการออกแบบครีป การติดตั้ง และการจัดวางให้เป็นทางเลือกแก่ผู้ใช้งานหรือผู้ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการพัฒนาต่อไป การพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะนำไปสู่การใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ลดการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานอย่างสูญเปล่า ซึ่งสามารถลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้การพัฒนาการเพิ่มสมรรถนะถ่ายเทความร้อนหรือแลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้น ทำให้มีประโยชน์ต่อกระบวนการต่างๆ ยิ่งถ้าเครื่องมีขนาดกะทัดรัดลงแต่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดียิ่งขึ้น ก็ยิ่งเป็นประโยชน์อย่างมาก สามารถลดต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรมได้ ซึ่งเป็นประโยชน์โดยตรงต่อการพัฒนาในเชิงเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นองค์ความรู้ที่ได้มาจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีที่ยั่งยืนเพื่อความ เป็นอยู่ที่ดีต่อสังคม ลดมลภาวะและผลกระทบต่างๆต่อสิ่งแวดล้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยพิจารณาการถ่ายเทความร้อนเป็นการพาความร้อนแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อ (Forced convection for flow inside tube) ซึ่งอธิบายถึงกลศาสตร์การไหล การถ่ายเทความร้อน การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน สมดุลพลังงาน สหสัมพันธ์การพาความร้อนรูปแบบต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ค่าความดันตกคร่อม การถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (TEF, Thermal performance enhancement factor) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้คำนวณได้ที่กำลังขับเดียวกัน

3.2 กลศาสตร์ของไหล

การไหลภายในท่อมืดมีขอบเขตจำกัด โดยที่ความหนาของชั้นขอบเขตการไหลไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เพราะว่าเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งชั้นขอบเขตการไหลก็ก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อจึงไม่สามารถขยายออกไปได้อีก รูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ซึ่งการไหลลักษณะเช่นนี้ เรียกว่าการไหลปรับตัวเต็มที่ (Fully developed flow) ส่วนการไหลก่อนหน้านี้เรียกว่าการไหลที่กำลังปรับตัว (Developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region

ตัวพารามิเตอร์ความดันตกคร่อมเกี่ยวข้องกับกำลังงานของพัดลมโดยตรง ยิ่งความดันตกคร่อมมากจำเป็นต้องใช้กำลังขับเคลื่อนของไหลมาก

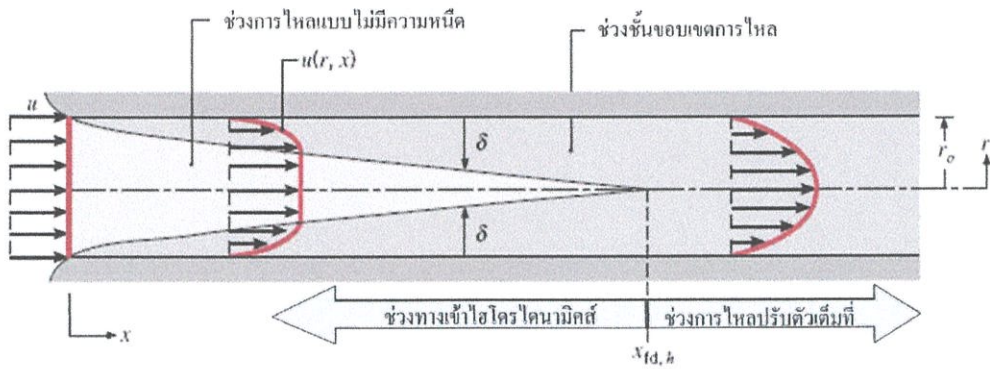
จาก $\dot{W}_{in} = Q \Delta p$ (3.1)

และ $\Delta p = f \frac{\rho L \bar{V}^2}{2D}$ (3.2)

เมื่อ \dot{W}_{in} คือ การจ่ายกำลังให้พัดลม
 Δp คือ ความดันตกคร่อมของของไหล

3.2.1 สภาวะการไหล

พิจารณาการไหลแบบราบเรียบในท่อกลมที่มีรัศมี r_0 ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การก่อตัวของชั้นขอบเขตการไหลของการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม

สำหรับการไหลภายในท่อนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (Entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบปั่นป่วน

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

เมื่อ Re_D คือ เลขเรย์โนลด์
 u_m คือ ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อ

เลขเรย์โนลด์วิกฤติ สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_{D,c} \approx 2,300$ และการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ ที่ $Re_D \geq 4,000$

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ความเร็วเฉลี่ย (mean velocity)

ความเร็วภายในท่อจะแปรเปลี่ยนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังนั้นจึงใช้ความเร็วเฉลี่ย u_m (mean velocity) แทน โดยนิยามว่าความเร็วเฉลี่ยคือ ความเร็วคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อ และความหนาแน่นของของไหล จะเท่ากับอัตราการไหลของมวล

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

ถ้าเป็นการไหลสภาวะคงที่ ที่อัดตัวไม่ได้ภายในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ค่า \dot{m} และ u_m ย่อมมีค่าคงที่ตลอดความยาวท่อ

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

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

เพราะว่าค่า \dot{m} อาจหาได้จากการอินทิเกรตของฟลักซ์มวล (ρu) ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด

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

ดังนั้น สำหรับท่อกลม กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ จะได้

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

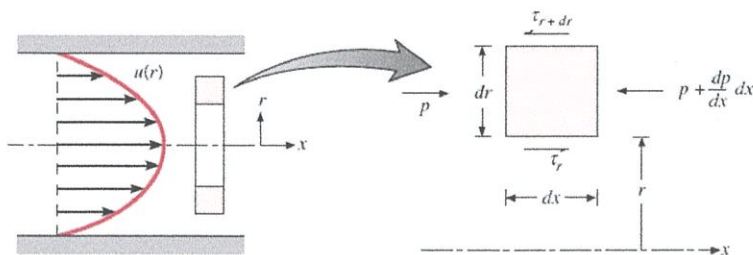
ซึ่งจะหาค่า u_m ได้ทันที เมื่อรู้ velocity profile, $u(r)$ ที่ตำแหน่งนั้น

3.2.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่

รูปทรงของความเร็วสามารถหาได้ สำหรับการไหลแบบราบเรียบของของไหลที่คุณสมบัติคงที่ อัดตัวไม่ได้ ในช่วงที่ปรับตัวเต็มที่ของท่อกลม (สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนใหญ่ต้องอาศัยผลจากการทดลองเป็นหลัก) โดยทั่วไปจะเป็นฟังก์ชันของรัศมี

สิ่งสำคัญสำหรับเงื่อนไขข้างต้น คือ ค่าความเร็วในแนวรัศมีและการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกนทุก 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 สมดุลแรงบนอิลิเมนต์ dx สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ก่อตัวเต็มที่ในท่อกลม

ดังนี้

สำหรับอิลิเมนต์ดิฟเฟอเรนเชียลรูปวงแหวนแสดงในรูปที่ 3.2 สามารถเขียนสมดุลของแรงได้

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

ซึ่งลดรูปเป็น

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

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

ดังนั้น จาก (3.11) จะเป็น

$$\frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} \quad (3.12)$$

เพราะว่า dp/dx นั้นไม่ขึ้นกับ r ดังนั้นเราสามารถอินทิเกรต (3.12) ได้

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

และ

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นรูปทรงของความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่ จะเป็นพาราโบลา และสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน (dp/dx) ต้องเป็นลบเสมอ

ผลลัพธ์ที่กล่าวมานี้อาจใช้หาค่าความเร็วเฉลี่ยได้ (u_m) โดยแทนสมการ (3.15) ใน (3.9) แล้วอินทิเกรต 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 (dp/dx)

3.2.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่

ในทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จะให้ความสนใจเกี่ยวกับการเกิดความดันตกคร่อมในการไหลภายในท่อ เนื่องจากตัวพารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับการหาขนาดกำลังงานของปั๊มหรือพัดลมโดยตรง ในการหาความดันตกคร่อม หาได้โดยใช้ตัวประกอบเสียดทานของ Moody ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยนิยามว่า

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

ค่านี้ต่างกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน C_f ซึ่งบางครั้ง เรียกว่า ตัวประกอบความเสียดทานแผ่นผนัง ซึ่งนิยามว่า

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่

$$f = \frac{64}{Re_D} \tag{3.21}$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่ การวิเคราะห์ยุ่งยากมากกว่าต้องใช้ผลจากการทดลองตัวประกอบเสียดทานสำหรับเลขเรย์โนลด์ค่าต่างๆ ได้แสดงในไดอะแกรมของ Moody ในรูปที่ 3.3 ตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์และสภาวะผิวของท่อ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับผิวเรียบและเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหยาบของผิวเพิ่มขึ้นโดยประมาณดังนี้

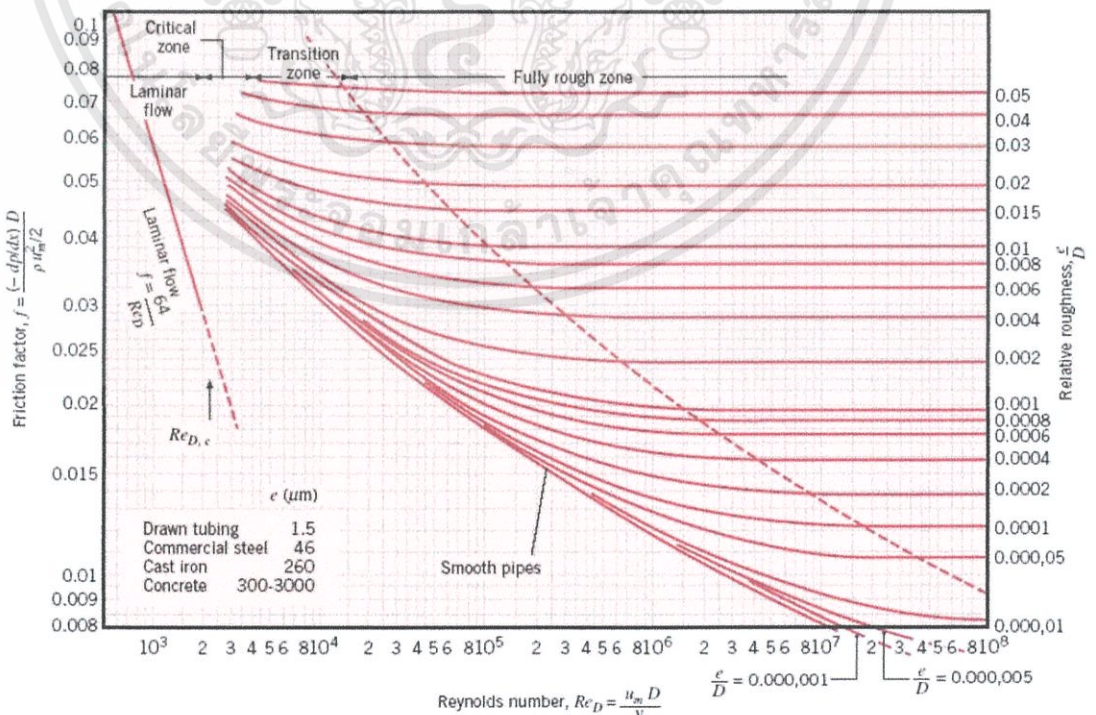
$$f = 0.316 Re_D^{-1/4} \quad Re_D < 2 \times 10^4 \tag{3.22}$$

$$f = 0.184 Re_D^{-1/5} \quad Re_D > 2 \times 10^4 \tag{3.23}$$

นอกจากนี้เรารู้ว่าความดันตกคร่อม (Δp) ระหว่างระยะ x_1 ถึง x_2 เป็น

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

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

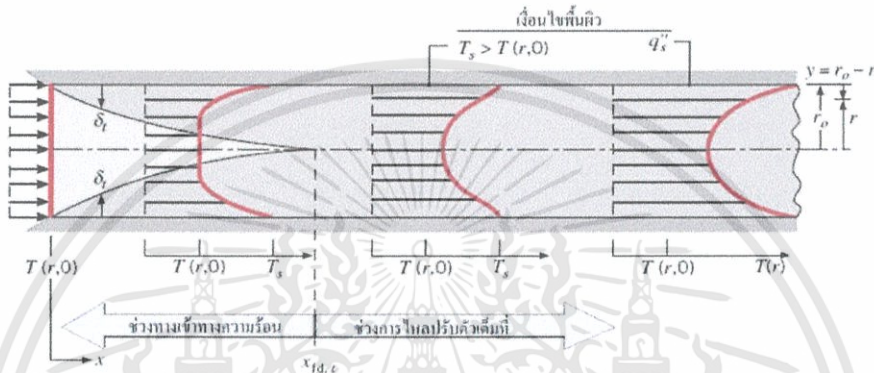


รูปที่ 3.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่ในท่อกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การถ่ายเทความร้อน

การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม แสดงในรูปที่ 3.4 ที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ $T(r,0)$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขอบเขตของความร้อนจะเริ่มต้นก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่ โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอคงที่ ($T_s = \text{คงที่}$) หรือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ ($q_s'' = \text{คงที่}$) สภาวะที่ปรับตัวคงที่ของความร้อน (Thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น ในที่สุดรูปร่างของอุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่จะแตกต่างกันตามเงื่อนไขไม่ว่าอุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่



รูปที่ 3.4 การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัว

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D} \right)_{lam} \approx 0.05 Re_D Pr \quad (3.25)$$

โดยการเปรียบเทียบบริเวณทางเข้า (Entrance region) ของอุณหภูมิตามสมการ (3.25) กับสมการของความเร็ว (3.4) จะพบว่าต่างกันที่ค่า Pr เท่านั้น จึงพอสรุปได้ว่า ถ้า $Pr > 1$ ไฮโดรไดนามิกส์บาวนด์ารีเลเยอร์ขยายเร็วกว่าบาวนด์ารีเลเยอร์ของความร้อนมาก ($x_{fd} > x_{fd,t}$) และจะกลับกันถ้า $Pr < 1$ สำหรับค่า Pr สูง ๆ เช่น น้ำมัน ($Pr \geq 100$) x_{fd} จะน้อยกว่า $x_{fd,t}$ มาก และอาจสมมุติได้ว่ารูปทรงของความเร็วที่ปรับตัวเต็มที่ มีตลอดช่วงบริเวณทางเข้าของความร้อน ในทางกลับกันของไหลที่มีค่า Pr ต่ำมาก ๆ เช่น โลหะเหลว ($Pr \leq 0.05$) รูปร่างอุณหภูมิมอาจเป็นแบบปรับตัวเต็มที่ได้เร็วมาก ในขณะที่รูปร่างของความเร็วยังอยู่ในช่วงกำลังก่อตัวอยู่ ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วนเงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ Pr และโดยการประมาณได้ว่า $x_{fd,t}/D = 10$

3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย

ในเรื่องอุณหภูมิ จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ย (T_m)

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

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 จะเปลี่ยนแปลงตามแนว x ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหล ซึ่งต่างจาก u_m มีค่าคงที่ สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

ฟลักซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

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

ซึ่ง h เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใด ๆ T_m เปลี่ยนแปลงตามทิศทาง นั่นคือ dT_m/dx จะไม่เป็นศูนย์ ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น

3.3.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่ (Fully developed conditions)

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของไหลยังคงเปลี่ยนแปลงตามระยะ x สิ่งหนึ่งที่ยากรู้คือเกิดภาวะ Thermal fully developed หรือยัง 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 สภาวะการปรับตัวเต็มที่ของอุณหภูมิไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรัชญาการนี้จะต้องจัดใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิเพื่อให้ได้เงื่อนไข

ความแตกต่างอุณหภูมิไร้มิติในรูป $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอยู่จริง ซึ่งอัตราส่วนนี้จะเป็นอิสระกับ x นั่นคือถึงแม้ว่า $T(r)$ ยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ x แต่รูปร่างสัมพัทธ์ของ profile นี้จะไม่เปลี่ยนแปลงเลย และการไหลแบบนี้เรียกว่า การไหลปรับตัวเต็มที่ทางความร้อน (Thermally fully developed) และจะได้ว่า

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

เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิผิวท่อ

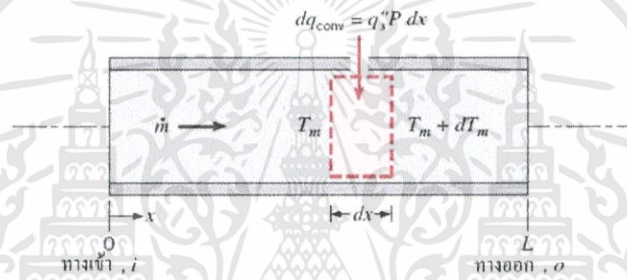
T คือ อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใด

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 (Energy Balance)

พิจารณาการไหลในท่อตามรูปที่ 3.5 ของไหลไหลด้วยอัตรามวลคงที่ \dot{m} และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของของไหล รวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางตามแนวแกนจะไม่นำมาคิด ดังนั้นถ้าไม่มีงานเพล่าซึ่งกระทำโดยของไหล ขณะไหลผ่านท่อ จะมีเพียงอิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและงานจากการไหลเท่านั้น



รูปที่ 3.5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ

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

โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 3.5 และจากนิยามของ T_m จะได้

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปของสมการ (3.32) เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขสำหรับท่อทั้งหมด โดยการอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อ จะได้

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

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

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

$$\text{Nu}_D = \frac{hD}{k} \quad (3.36)$$

เมื่อ q_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด
 h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
 T_b คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล
 Nu_D คือ นัสเซิลท์นัมเบอร์
 เงื่อนไขความร้อนที่ผิว คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ โดยตีแผ่พื้นทำความร้อนที่ผิวครึ่ง

3.5 สหสัมพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบราบเรียบในท่อกลม

ช่วงบริเวณที่ปรับตัวเต็มที่ ที่จุดใดๆ ในท่อ จะได้สมการพลังงานเป็น

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

เทอมทางซ้ายมือของสมการ (3.37) เป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการพา และเทอมทางขวามือเป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการนำ 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

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

ซึ่งเทอม $(2u_m/\alpha)(dT_m/dx)$ คงที่ โดยการแยกตัวแปรและอินทิเกรต 2 ครั้ง จะได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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 $C_2 = T_s - (2u_m/\alpha)(dT_m/dx)(3r_0^2/16)$ ดังนั้นสำหรับช่วงที่ปรับตัวเต็มที และฟลักซ์ความร้อน(heat flux) ที่ผิวคงที่จะได้การกระจายของอุณหภูมิในรูป

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

เมื่อรู้การกระจายของอุณหภูมิ ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ก็สามารถหาได้ เช่น ถ้ารู้รูปร่างของความเร็วและอุณหภูมิตามสมการ (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

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

จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน สมการ (3.28) และ (3.42) ได้ว่า

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

หรือ

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = 4.36 \quad \text{สำหรับ } q_s'' \text{ คงที่} \quad (3.43)$$

ดังนั้นในท่อกลมที่มีคุณลักษณะฟลักซ์ความร้อน(heat flux) ที่ผิวคงที่ การไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที ค่าเลขนัสเซิลท์(Nusselt number) จะคงที่ ไม่ขึ้นกับ Re_D , Pr และตำแหน่งตามแนวแกน x

3.6 สหสัมพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการหา Nu_x สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่ในท่อกลมเรียบ เสนอโดย Colburn ซึ่งได้มาจาก Chilton-Colburn analogy [33]

$$\frac{C_f}{2} = \frac{f}{8} = StPr^{2/3} = \frac{Nu_D}{Re_D Pr} \quad (3.44)$$

แทน f จากสมการ (3.23) สมการของ Colburn เป็น

$$Nu_D = 0.023Re_D^{4/5}Pr^{1/3} \quad (3.45)$$

Dittus-Boelter ได้เสนอสมการเป็น

$$Nu_D = 0.023Re_D^{4/5}Pr^n \quad (3.46)$$

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

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

สมการนี้ได้รับการยืนยันจากผลการทดลองสำหรับช่วงของเงื่อนไขดังนี้

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

สมการต่าง ๆ นี้จะใช้เพียงเฉพาะกรณีย่อย ๆ ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ ($T_s - T_m$) ไม่มากนัก โดยคุณสมบัติต่าง ๆ คัดที่ T_m สำหรับการไหลที่แสดงลักษณะการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติมาก ๆ Seider และ Tate ได้แนะนำให้ใช้สมการต่อไปนี้

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

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 μ_s หาที่ T_m โดยที่ μ_s หาที่ T_w

3.7 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Enhancement) โดยการทำให้เกิดการหมุนวนด้วยการสอดใส่แผ่นกั้นตามรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นผลให้ความเร็วของการไหลเพิ่ม เนื่องจากความเร็วสัมผัสเพิ่มใกล้เคียงท่อ การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นผลให้เกิดความดันตกคร่อม (Pressure drop) มากขึ้น



รูปที่ 3.6 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการติดแผ่นกั้นรูปตัวยูเอียง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 ขอบเขตการออกแบบ

ในบทนี้ได้กล่าวถึง การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลองเพื่อหาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อกลมโดยการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัวยูเอียง ตลอดจนวิธีการทดลองในแต่ละขั้นตอนและการเก็บข้อมูลนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากท่อเปล่า โดยพิจารณาจากการใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่ทำมุมปะทะการไหล 20° , 30° และ 45° อัตราส่วนการบล็อกการไหล 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนระยะพิทช์ 0.5, 1 และ 2

จากนั้นจะกล่าวถึง สมการในการวิเคราะห์ข้อมูลการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลม โดยตัวเลขนัสเซลท์ (Nu) จะเป็นพจน์ค่าการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบความเสียดทาน (f) จะเป็นพจน์ของค่าความดันตกคร่อม จากนั้นนำค่ามาเปรียบเทียบกับท่อเปล่าเรียบ ซึ่งเป็นข้อมูลที่กำลังับเดียวกัน

4.2 การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลอง

4.2.2 ท่อทางเข้าชุดทดลอง

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

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

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

ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วน ($Re_D \geq 4,000$) ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับเลขเรย์โนลด์และมีค่าประมาณดังนี้

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

สำหรับค่าที่ใช้ในที่นี้ เราจะสมมุติว่า $x_{fd} = 30D_h$ สำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่ (Fully developed flow)

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

ดังนั้น ในการทดลองจึงกำหนดท่อทางเข้าชุดทดลองให้มีความยาว 1.8 เมตร ในการทดลองชุดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 เครื่องเป่าลม

การกำหนดขนาดเครื่องเป่าลม โดยพิจารณาที่เลขเรย์โนลด์ $Re = 24,000$ ซึ่งการทำงานของพัดลมในช่วงรับภาระสูงสุด

จากตารางคุณสมบัติอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 318 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

$$\begin{aligned} Q &= \bar{V} A_c \\ &= 8.35 \times \frac{\pi D^2}{4} \\ &= 0.0164 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 0.984 \text{ m}^3/\text{min} \end{aligned}$$

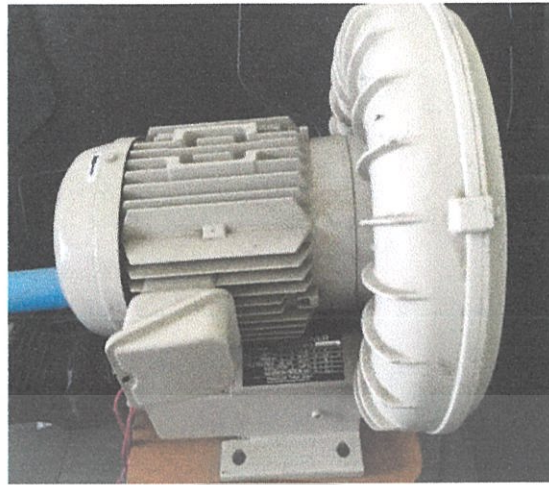
ดังนั้น ในการทดลองกำหนดให้ใช้เครื่องเป่าลม ที่สามารถให้ค่าอัตราการไหลมากกว่า 0.984 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

4.3 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

การจัดเตรียมและสร้างอุปกรณ์ในการทดลอง มีรายละเอียดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

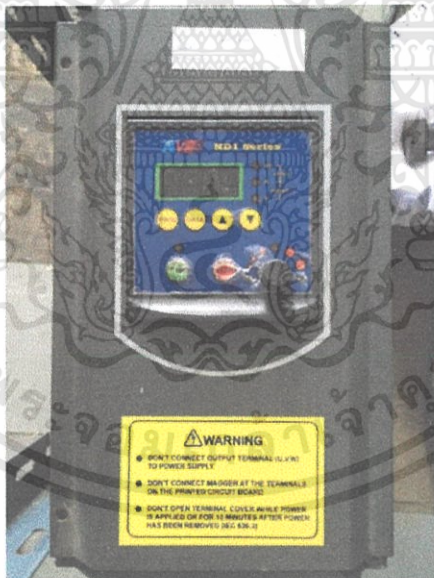
4.3.1 แหล่งจ่ายอากาศ

แหล่งจ่ายอากาศ ใช้เครื่องเป่าลม (High-pressure blower) HITACHI VB-020-DN เป็นแบบพัดลมหอยโข่งแรงดันสูง ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ หรือ 2 HP ความดัน 5.9 kPa แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 พัดลมแรงดันสูง (High-pressure blower)

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) Omron Inverter, 3G3JX-A4037, 380-480V 3PHASE 3.7kw 5HP เป็นอินเวอร์เตอร์แบบปรับความถี่ (Frequency Inverter) ถูกนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับพัดลม ในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตามที่กำหนด แสดงในรูปที่ 4.1

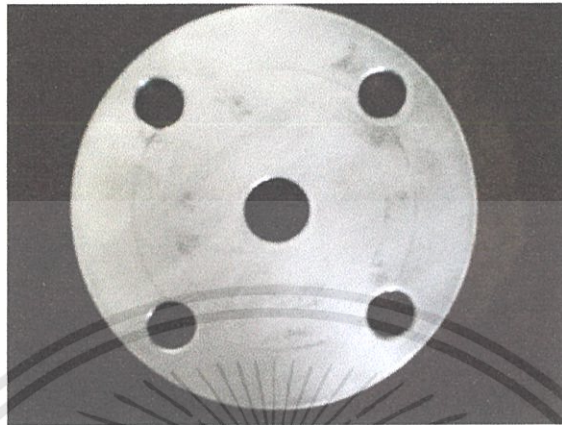


รูปที่ 4.2 Inverter

4.3.2 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

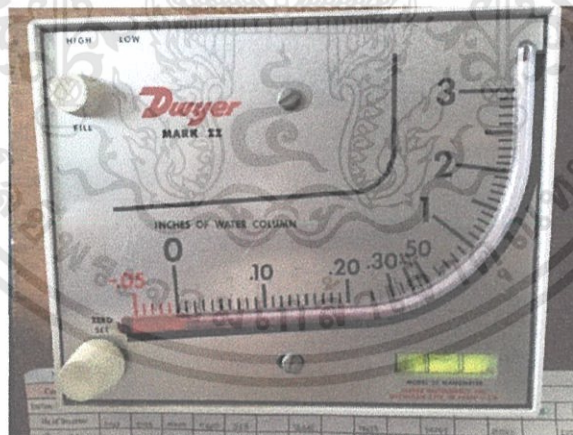
Orifice meter เป็นอุปกรณ์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศ ติดตั้งที่ทางเข้าชุดทดลอง ระหว่างเครื่องปั๊มลมและถังพักลม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ในการสร้างอุปกรณ์ Orifice meter ได้สร้างตามมาตรฐานของ JIS (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD) Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes JIS Z 8762 ทำจากแผ่นเหล็ก ความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนา 5 มิลลิเมตร โดยออริฟิซออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านหน้า 47 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านหลัง 51 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.3 และรายละเอียดเพิ่มเติมของออริฟิซแสดงในภาคผนวก ข.



รูปที่ 4.3 Orifice meter

เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer) รุ่น Mark II Model No.25 ใช้วัดความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลัง Orifice meter เพื่อใช้หาอัตราการไหลของอากาศ ความแตกต่างของความดัน ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากความแตกต่างของระดับ red gage oil (specific gravity = 0.826) แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer)

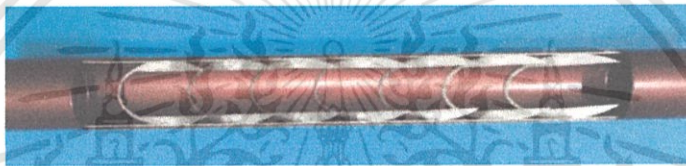
4.3.3 ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม

ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมด้วยแผ่นกั้นรูปตัวยูเอียง โดยติดตั้งแผ่นกั้นโดยการสอดใส่ แสดงในรูปที่ 4.5 ตามการออกแบบการทดลองติดตั้งที่ทางเข้าช่วงทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดลองกับท่อผนังเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ชุดทดลองที่ใช้ทดลอง

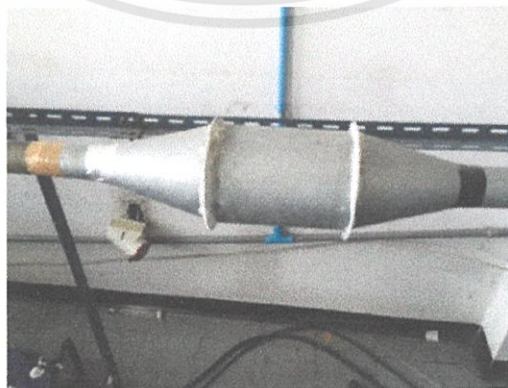


รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ติดแผ่นกันรูปตัวยูเอียงที่ใช้ทดลอง

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

4.3.4 ถังพักลม (Settling tank)

ถังพักลม เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับสภาพการไหลของอากาศ เพื่อให้จัดเรียงและปรับสภาพการไหลอากาศ ให้เกิดการปั่นป่วนน้อยสุดก่อนเข้าสู่ท่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ท่อยาวทั้งหมดเท่ากับ 3 เมตร แสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ถังพักลม (Settling tank)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

R3000 series Color Paperless Recorder, SUPCON เป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Recorder) และแสดงผลอุณหภูมิ สามารถแสดงค่าอุณหภูมิได้ทั้งหมด 12 ค่า การใช้งานโดยเชื่อมต่อเครื่องเข้ากับเทอร์โมคอปเปิล ทั้งหมด 12 ตัว เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิว 10 ตำแหน่ง อุณหภูมิทางเข้าและทางออกส่วนทดสอบ 2 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 เครื่องเก็บข้อมูล

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิผิวปีกบาง อุณหภูมิที่ทางเข้าปีกบาง และอุณหภูมิที่ทางออกปีกบาง แสดงในรูปที่ 4.9 โดยเทอร์โมคัปเปิลแบบชนิด K จำนวน 10 ตัว เพื่อวัดอุณหภูมิผิวทั้งหมด 10 ตำแหน่งและเทอร์โมคัปเปิลแบบ RTD Pt100 จำนวน 2 ตัว เพื่อวัดอุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกส่วนทดสอบ



แบบ RTD Pt100

แบบชนิด K

รูปที่ 4.9 เทอร์โมคัปเปิล

4.3.6 เครื่องวัดความดันตกคร่อม

เครื่องวัดความดันตกคร่อม (Differential pressure gages) รุ่น Dwyer 475 Mark III ช่วงการใช้งาน 0-10.00 IN W.C. (0-2.49 kPa) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันตกคร่อมระหว่างส่วนทดสอบ แสดงในรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 เครื่องวัดความดันตกคร่อม, Dwyer 475 Mark III Digital Manometer

4.3.7 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ

เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (Vane-type Anemometer) รุ่น 445 ยี่ห้อ TESTO เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วลมที่ตำแหน่งทางออกของชุดออริฟิส ใช้ในการสอบเทียบ (Calibration) ความเร็วลมในการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.11

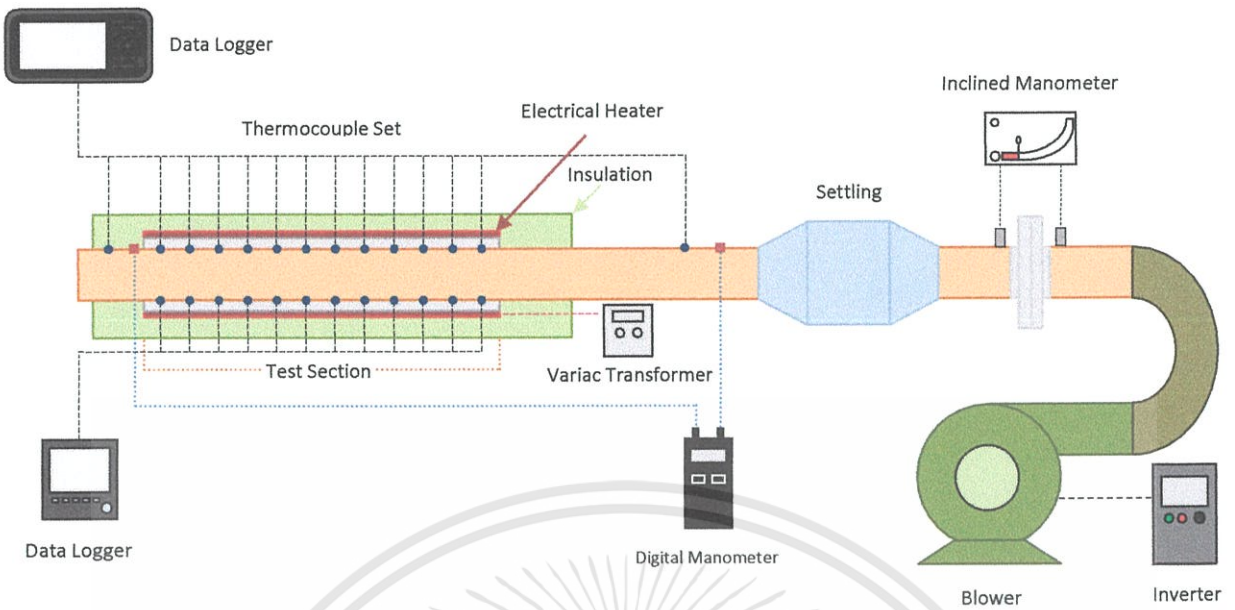


รูปที่ 4.11 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (Vane-type Anemometer), TESTO 445

4.4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

4.4.1 อุปกรณ์ชุดทดลอง

ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นและอุปกรณ์การทดลองต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.12 อากาศ เป็นของไหลทดสอบในส่วนของถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน ถูกส่งตรงเข้าสู่ระบบโดยเครื่องเป่าลมความดันสูง (High-pressure blower) ขนาด 1.5 kW โดยท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7 มิลลิเมตร ใช้เชื่อมต่อระหว่างพัดลมกับถังพักลม (Settling tank) โดยมีอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็วรอบการทำงานของพัดลมภายในเครื่องเป่าลม เพื่อให้ได้อัตราการไหลของอากาศตามที่ต้องการ ออกแบบไว้ อัตราการไหลของอากาศในระบบถูกวัดโดยใช้แผ่นออริฟิสทดสอบเทียบค่ามาก่อนโดยใช้ Hot wire และ Vane-type Anemometers (Testo 445) ความดันตกคร่อมออริฟิส วัดโดยใช้ Inclined manometer เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



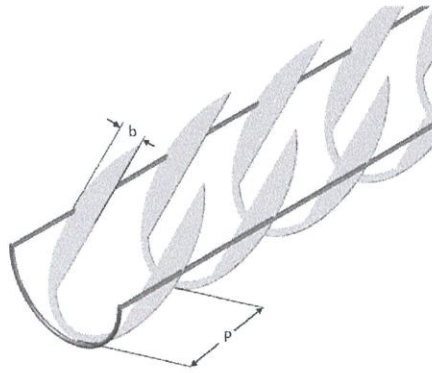
รูปที่ 4.12 แผนผังของชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม

โครงสร้างของท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ซึ่งปีกบางถูกสร้างจากแผ่นอะลูมิเนียม การวัดอุณหภูมิมีส่วนทดสอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 24 ตัวถูกติดตั้งที่ผนังด้านบนและด้านข้างของช่วงท่อทดสอบอย่างละ 12 ตัว และเทอร์โมคัปเปิลแบบ RTD Pt100 อีกจำนวน 2 ตัวใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและขาออกจากช่วงท่อทดสอบ โดยค่าอุณหภูมิทั้งหมดจะแสดงผลผ่านเครื่อง Data Logger ผนังด้านนอกของช่วงท่อทดสอบมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนสำหรับให้ความร้อนภายใต้สภาวะเงื่อนไขหลักความร้อนคงที่ เครื่อง Digital differential pressure ถูกใช้สำหรับอ่านค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากจุดวัดค่าความดันที่อยู่คร่อมช่วงท่อทดสอบ

จุดวัดความดันสถิตย์ 2 จุด อยู่ที่ด้านบนของท่อเพื่อวัดความดันตกคร่อมตามแนวกันของส่วนทดสอบ เพื่อให้หาค่าตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งจุดที่วัด จุดแรกตำแหน่ง 40 มิลลิเมตรจากขอบทางเข้าส่วนทดสอบและจุดสอง 40 มิลลิเมตรจากขอบทางออกส่วนทดสอบ ค่าความดันตกคร่อมวัดโดยใช้เครื่องวัดผลต่างความดันแบบดิจิตอลเชื่อมต่อกับจุดวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 มิลลิเมตร

4.4.2 อุปกรณ์ติดตั้งแผ่นกันที่ใช้ทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ทดลองมีลักษณะเป็นเส้นลวดยาวตรง โดยมีแผ่นกันถูกติดตั้งตามแนวยาว ใช้สอดใส่ในท่อกลม เพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆของแผ่นกันรูปตัวยูเอียงแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ มุมปะทะของของไหลเท่ากับ 20° , 30° และ 45° อัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนของระยะพิชเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 อุปกรณ์ติดตั้งแผ่นกันรูปตัวยูเอียงที่ใช้ทดลอง

4.5 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งแผ่นกันในส่วนทดสอบของชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม
2. เปิดสวิทช์เครื่องปั๊มลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง และปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็วรอบการทำงานของเครื่องปั๊มลมเพื่อให้ได้อัตราการไหลของอากาศตามที่ออกแบบไว้ โดยดูอัตราการไหลของอากาศในระบบจากค่าความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิส
3. วัดค่าความดันตกคร่อมส่วนทดสอบ ที่ความเร็วลมทั้ง 10 ระดับตามที่ออกแบบไว้ แล้วปรับความเร็วลมที่ค่าความเร็วลมค่าแรกของการทดสอบ
4. เปิดสะพานไฟจ่ายไฟให้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ปรับค่าความต่างศักย์แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับจ่ายไฟให้กับแผ่นทำความร้อน เพื่อให้ความร้อนกับผิวท่อด้วยเงื่อนไขที่พลังค์ความร้อนคงที่
5. สังเกตอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 26 ตำแหน่ง คือ อุณหภูมิผิวทดสอบ 24 ตำแหน่ง และอุณหภูมิทางเข้าและทางออก 2 ตำแหน่ง ให้อุณหภูมิคงที่ แล้วทำการบันทึกผล อุณหภูมิผิวทดสอบ อุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกส่วนทดสอบ
6. ปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่มความเร็วลมตามค่าที่ออกแบบไว้ค่าต่อไปจนครบทั้ง 10 ระดับ ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์อยู่ตั้งแต่ 5,300 ถึง 24,000 แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 4 – 5
7. เปลี่ยนแผ่นกันในส่วนทดสอบของชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมแล้วดำเนินการทดลองตามขั้นตอน 2 ถึง 6 ตามลำดับ เพื่อเก็บค่าความดันตกคร่อมส่วนทดสอบ อุณหภูมิผิวทดสอบ อุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกส่วนทดสอบ ตามค่าความเร็วลมที่ออกแบบไว้ทั้ง 10 ระดับ
8. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของตัวเลขนัสเซลล์ ค่าการสูญเสียความดันซึ่งอยู่ในรูปของตัวประกอบเสียดทาน และค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน ซึ่งจะกล่าวถึงสมการการคำนวณในหัวข้อ 4.6 ต่อไป

4.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

เป้าหมายของงานวิจัยนี้เพื่อหาการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมในพจน์ของตัวเลขนัสเซิลท์ โดยเลขเรย์โนลด์ในพจน์ของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) สามารถเขียนได้เป็น

$$Re = UD_h/\nu, \quad (4.1)$$

เมื่อ U และ ν เป็นความเร็วเฉลี่ยและความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (h) หาค่าได้จากการวัดอุณหภูมิและความร้อนที่ป้อนเข้าระบบ ความร้อนที่ให้กับอากาศ (Q_{air}) และความแตกต่างของอุณหภูมิผนังท่อกับอุณหภูมิอากาศ ($T_w - T_b$), สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยหาได้จากข้อมูลทดลอง ดังสมการ

$$Q_{air} = Q_{conv} = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \leq VI \quad (4.2)$$

$$h = \frac{Q_{conv}}{A(\bar{T}_s - T_b)} \quad (4.3)$$

โดยที่

$$T_b = (T_o + T_i)/2 \quad (4.4)$$

และ

$$\bar{T}_s = \sum T_s/24 \quad (4.5)$$

พจน์ A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนแบบการพาของผนังท่อกลมที่ถูกให้ความร้อน เมื่อ \bar{T}_s คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยที่ได้จากอุณหภูมิผิวท่อในแต่ละจุด (T_s) ตามแนวยาวของท่อ, T_i , T_o คือ อุณหภูมิทางเข้าและทางออกตามลำดับ โดยพจน์ \dot{m} , C_p , V และ I คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า ตามลำดับ

เลขนัสเซิลท์เฉลี่ย (Nu) เขียนได้เป็น

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (4.6)$$

ตัวประกอบเสียดทาน (f) หาค่าได้จาก

$$f = \frac{2}{(L/D_h)} \frac{\Delta P}{\rho U^2}, \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ΔP คือ ค่าความดันตกคร่อม, ρ คือ ความหนาแน่นของของไหลและ k คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศ คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศถูกกำหนดที่อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย (T_b) จากสมการ (4.4)

ที่สภาวะกำลังขับ (Pumping power) เดียวกัน

$$(\dot{V}\Delta P)_0 = (\dot{V}\Delta P) \quad (4.8)$$

เมื่อ \dot{V} อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศและเขียนในพจน์ตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ ได้เป็น

$$\begin{aligned} (fRe^3)_0 &= (fRe^3) \\ Re_0 &= Re(f/f_0)^{1/3} \end{aligned} \quad (4.9)$$

ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (Thermal performance enhancement factor, TEF) คือ อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวทดสอบ (h) เทียบกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนท่อผนังเรียบ (h_0) ที่กำลังขับเดียวกัน

$$TEF = \frac{h}{h_0} \Big|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \Big|_{pp} = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (4.10)$$

ซึ่งจะเป็นตัวชี้วัดที่แสดงให้เป็นถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยเมื่อให้ค่ามากกว่า 1 แสดงว่าให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อผนังเรียบ เมื่อใช้กำลังขับเครื่องปั๊มลมของระบบค่าเดียวกัน โดยการพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูงสุด ซึ่งจะเป็นผลให้สามารถลดขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและประหยัดพลังงานที่ต้องป้อนให้กับระบบ นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต เกิดประโยชน์ทั้งในแง่การลดพื้นที่การติดตั้ง ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ด้วยราคาขายที่ต่ำลง ลดการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการช่วยเยียวยาและแก้ปัญหาวิกฤตทรัพยากรพลังงาน

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการเพิ่มสมรรถนะความร้อนโดยทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในพจน์ของตัวเลขนัสเซลท์ (Nu) และค่าความดันตกคร่อมในพจน์ของตัวประกอบความเสียดทาน (f) จากนั้นศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะการไหล อัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตซ์ เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมกับท่อผนังเรียบ และค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) ดังต่อไปนี้

5.2 ผลการทดลองกับท่อผนังเรียบ

การนำเสนอผลการทดลองของการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมภายในท่อเปล่าจะแสดงในพจน์ของตัวเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียดทาน ตามลำดับ เพื่อความน่าเชื่อถือของชุดทดสอบดังนั้นจึงทำการทดสอบท่อเปล่าและนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ โดยผลตัวเลขนัสเซลท์จากการทดลองได้นำไปเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ในขณะที่ค่าตัวประกอบความเสียดทานจะทำการเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Blasius

สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter

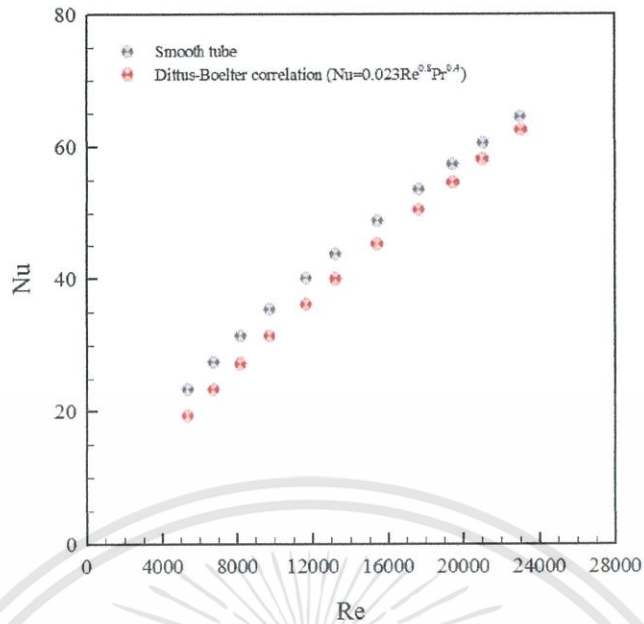
$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5.1)$$

สหสัมพันธ์ของ Blasius

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \quad (5.2)$$

5.2.1 ค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number)

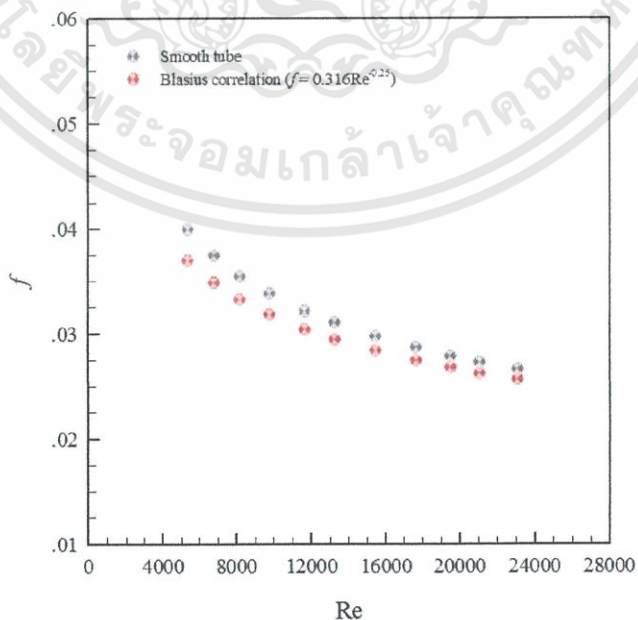
รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อมีผนังเรียบจากการทดลองพบว่าเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าตัวเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ที่ค่า เรย์โนลด์ค่าเดียวกัน ค่าตัวเลขนัสเซลท์จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าค่าตัวเลขนัสเซลท์จากสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter โดยค่าตัวเลขนัสเซลท์จากการทดลองจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 7.746% เมื่อเทียบกับค่าตัวเลขนัสเซลท์จาก สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขไรย์โนลด์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อมีผนังเรียบโดยเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนจากการทดลองกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter

5.2.2 ค่าตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor)

รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อมีผนังเรียบ จากการทดลองพบว่าเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลง แต่ที่ค่าเรย์โนลด์ค่าเดียวกัน ค่าตัวประกอบความเสียดทานจากการทดลองจะมีค่ามากกว่าค่าตัวประกอบความเสียดทานจาก สหสัมพันธ์ของ Blasius โดยค่าตัวประกอบความเสียดทานจากการทดลองจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 5.372% เมื่อเทียบกับค่าตัวประกอบความเสียดทานจาก สหสัมพันธ์ของ Blasius



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อมีผนัง

เรียบโดยเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อมจากการทดลองกับสหสัมพันธ์ของ Blasius

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

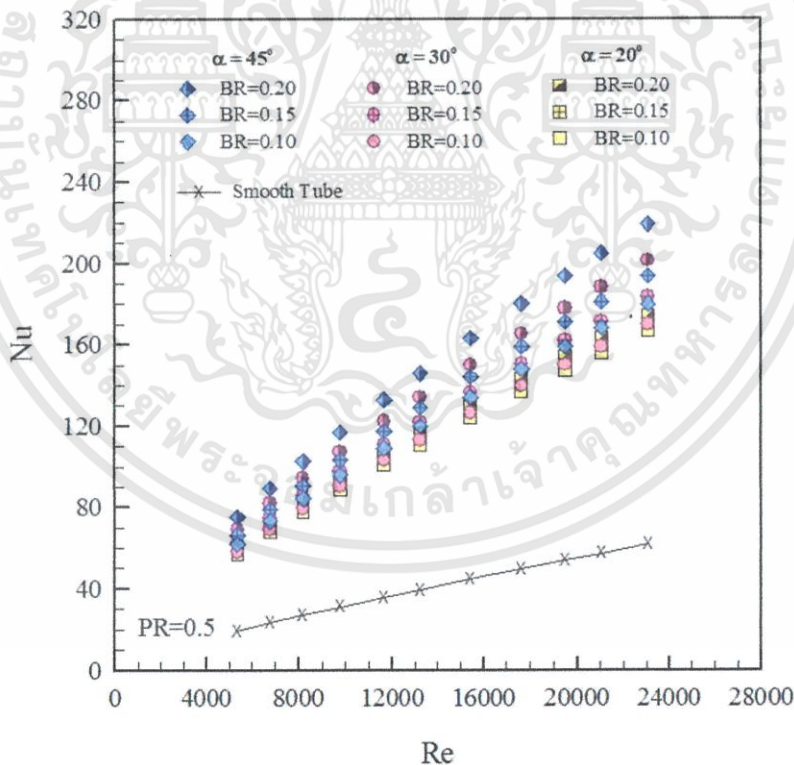
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดลองด้วยการใส่วงแหวนตัวยูเอียง

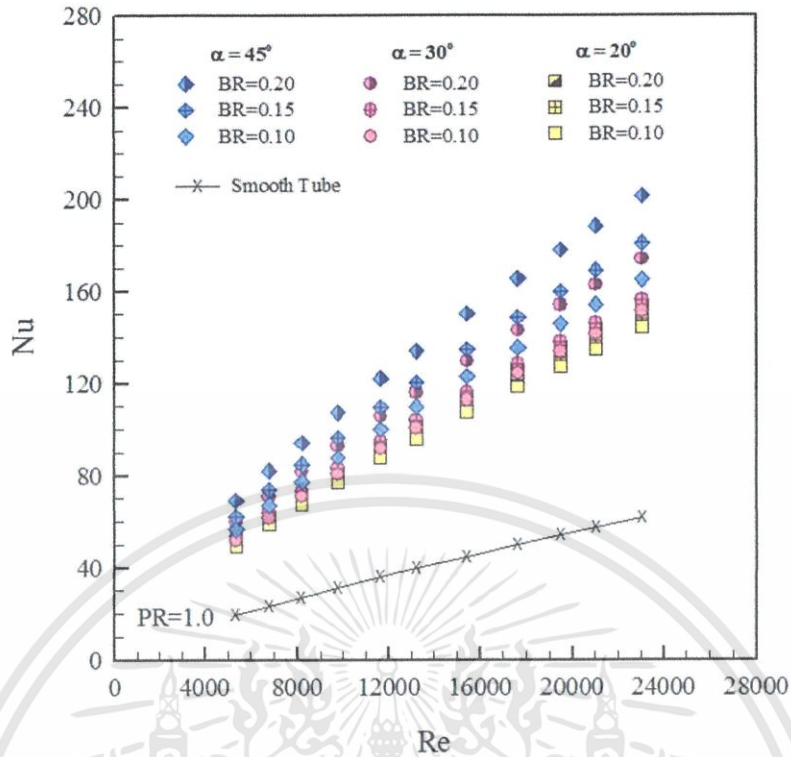
5.3.1 อิทธิพลของมุมปะทะการไหลที่อัตราส่วนระยะพิตช์เดียวกัน

การเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซลท์ของกรณีใส่วงแหวนตัวยูวางเอียงมุมปะทะต่างๆ ที่อัตราส่วนการบล็อกการไหล เท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ พบว่าการใส่วงแหวนตัวยูเอียงมุมปะทะเท่ากับ 45° จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด รองลงมาคือมุมปะทะเท่ากับ 30° และ 20° ตามลำดับ เนื่องจากขนาดมุมปะทะจะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหล โดยมุมปะทะที่มีค่ามากจะขัดขวางการไหลได้ดีกว่าซึ่งส่งผลต่อความรุนแรงของความปั่นป่วนของการไหลได้มากกว่า

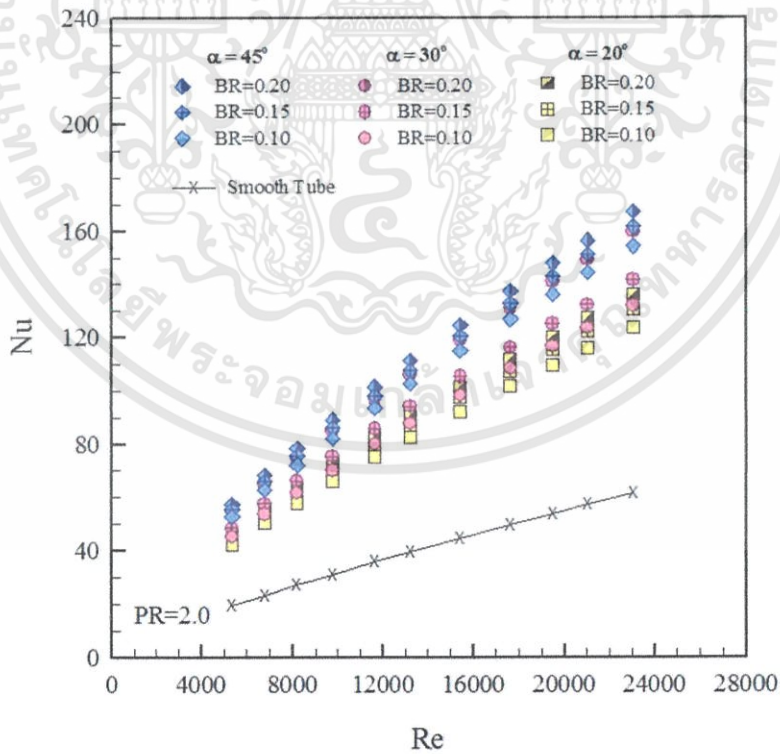
และในการเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียหายของกรณีใส่วงแหวนตัวยูเอียงวางเอียงมุมปะทะต่างๆที่อัตราส่วนการบล็อกการไหล เท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ พบว่าค่าตัวประกอบความเสียหายจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของค่ามุมปะทะที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์และตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกัน เนื่องจากลักษณะการใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีมุมปะทะการไหลมีค่ามากกว่าจะขัดขวางกระแสการไหลของของไหลทำงานมากกว่า ทำให้เกิดความดันตกคร่อมที่สูงกว่าจึงส่งผลถึงค่าตัวประกอบความเสียหายที่สูงกว่าการใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีมุมปะทะการไหลมีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 0.5

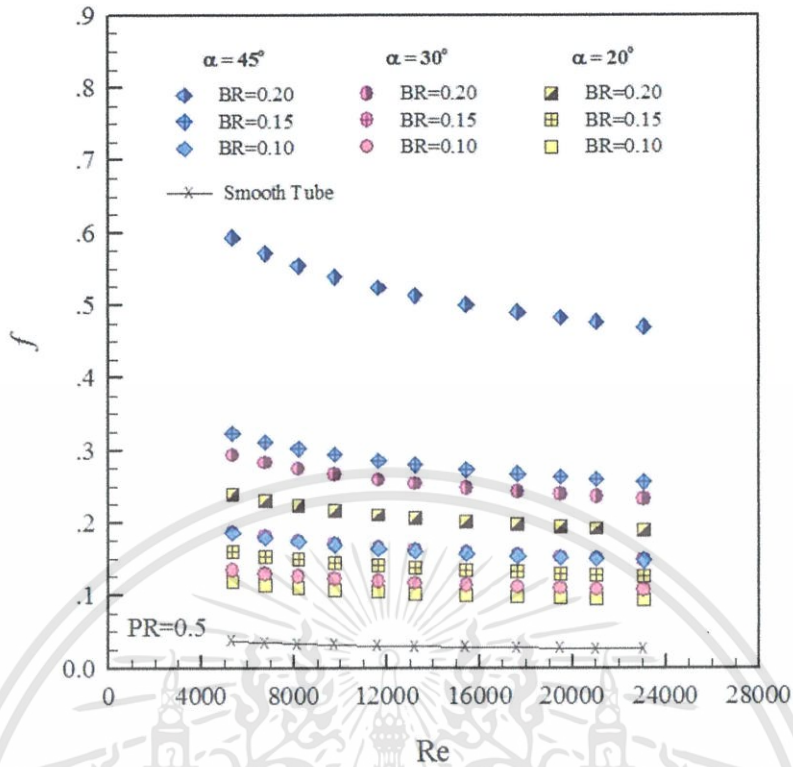


รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียง ที่มีมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วน ระยะพิตช์เท่ากับ 1.0

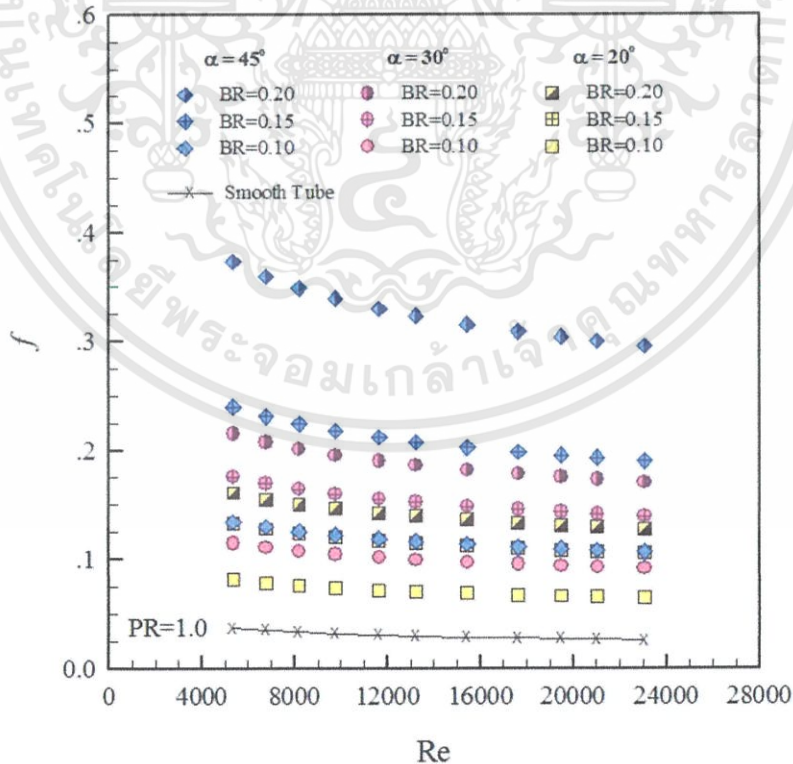


รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียง ที่มีมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วน ระยะพิตช์เท่ากับ 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

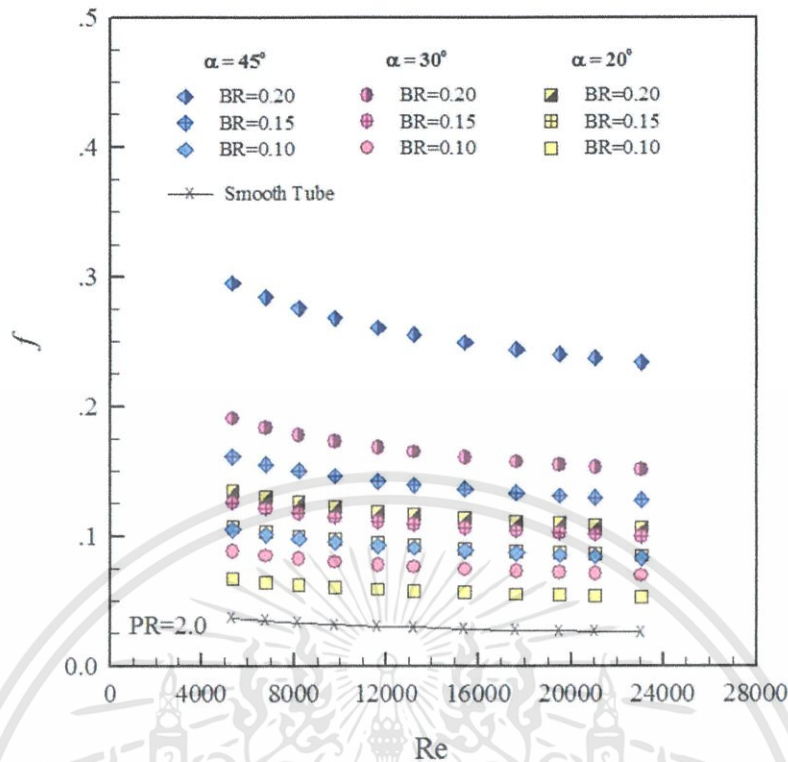


รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิตซ์เท่ากับ 0.5



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิตซ์เท่ากับ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

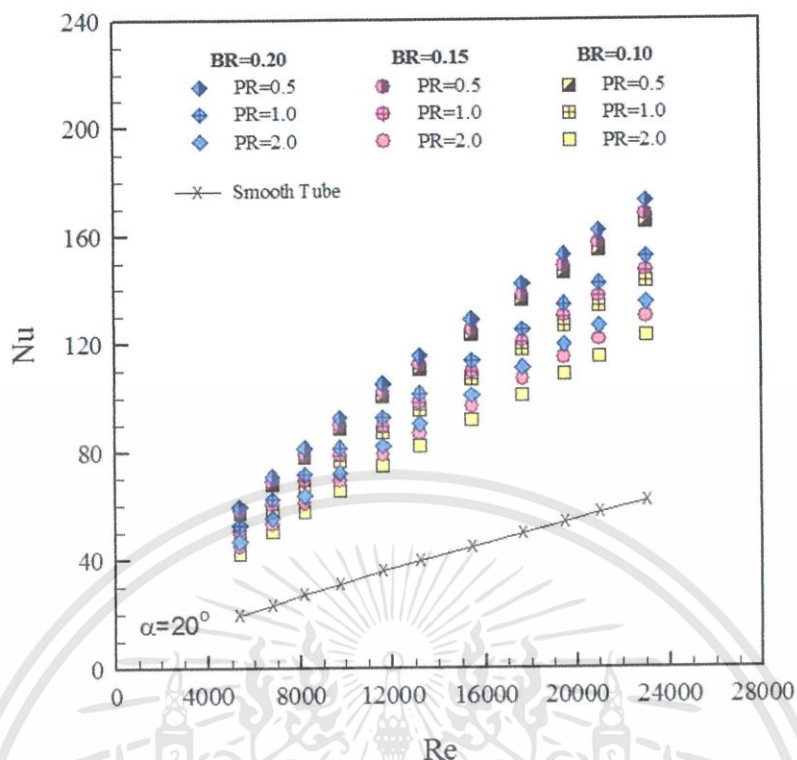


รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิตซ์เท่ากับ 2.0

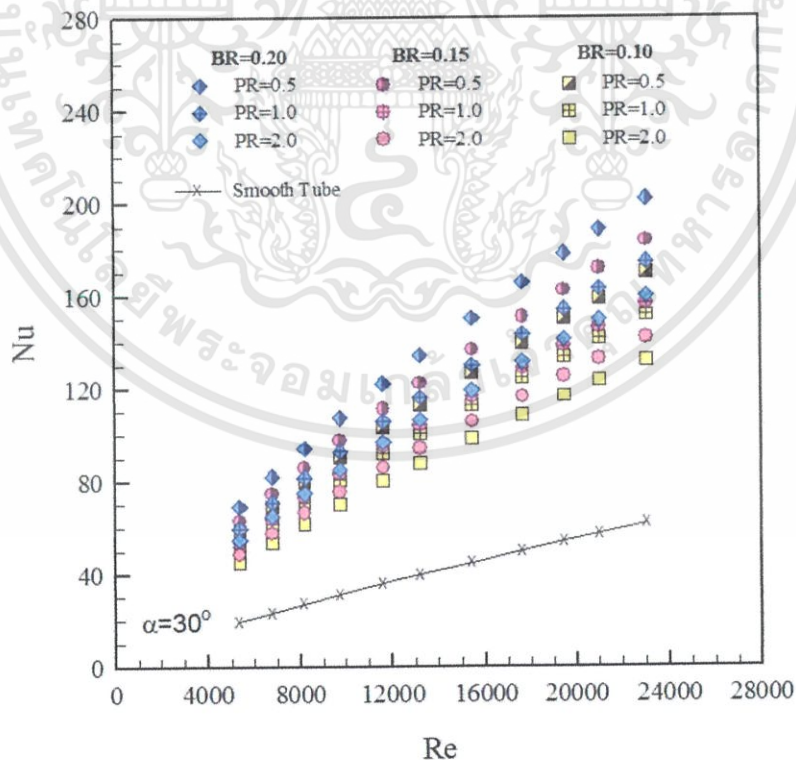
5.3.2 อิทธิพลของอัตราส่วนการบล็อกการไหลที่มีมุมปะทะการไหลเดียวกัน

การเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซลท์ของกรณีใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ ที่มีมุมปะทะการไหล เท่ากับ 20° , 30° และ 45° และอัตราส่วนระยะพิตซ์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ พบว่ากรณีใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20 จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด รองลงมาคือมุมปะทะเท่ากับ 0.15 และ 0.10 ตามลำดับ เนื่องจากอัตราส่วนการบล็อกการไหลจะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหล โดยอัตราส่วนการบล็อกการไหลที่มีค่ามากจะขัดขวางการไหลได้ดีกว่าซึ่งส่งผลต่อความรุนแรงของความปั่นป่วนของการไหลได้มากกว่า

และในการเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานของกรณีใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลต่างๆ ที่มีมุมปะทะการไหล เท่ากับ 20° , 30° และ 45° และอัตราส่วนระยะพิตซ์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ พบว่าค่าตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนการบล็อกการไหลที่มีมุมปะทะการไหลและตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกัน เนื่องจากลักษณะการใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลมีค่ามากกว่าจะขัดขวางกระแสการไหลของของไหลทำงานมากกว่า ทำให้เกิดความดันตกคร่อมที่สูงกว่าจึงส่งผลถึงตัวประกอบความเสียดทานที่สูงกว่าการใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลมีค่าน้อยกว่า

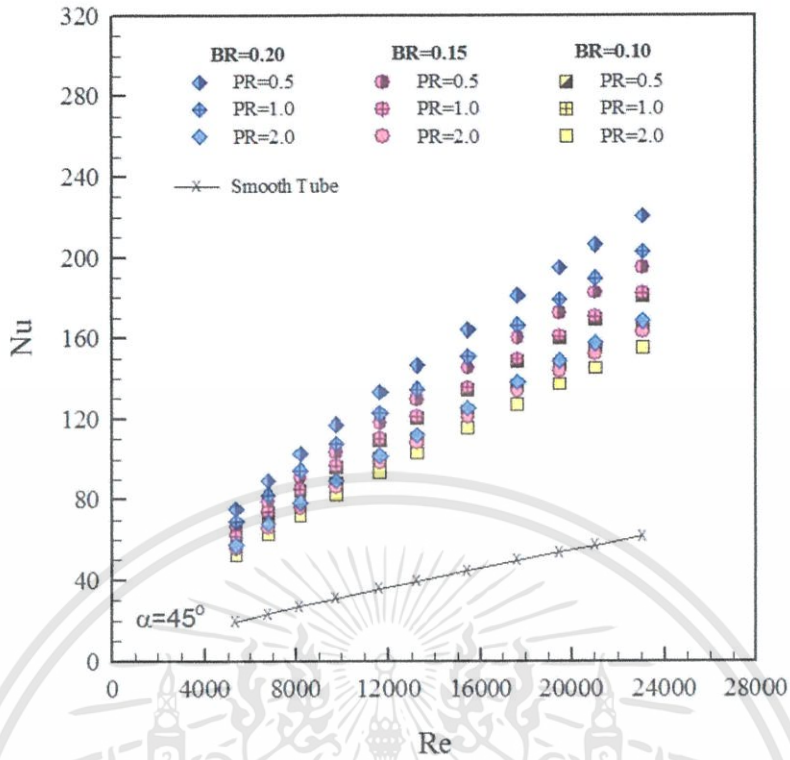


รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียง ที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20°

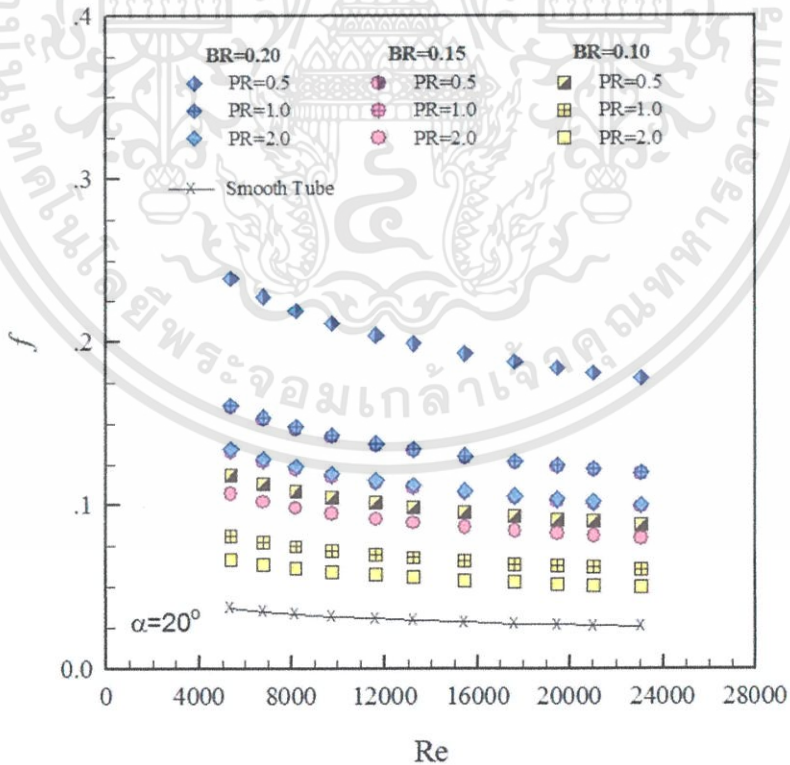


รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียง ที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

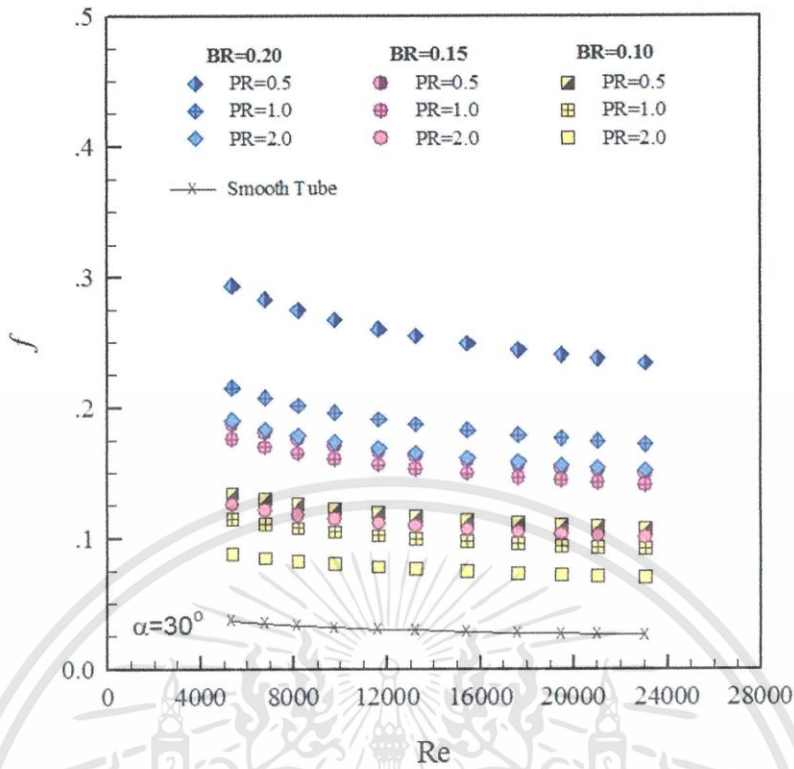


รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีสองท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45°

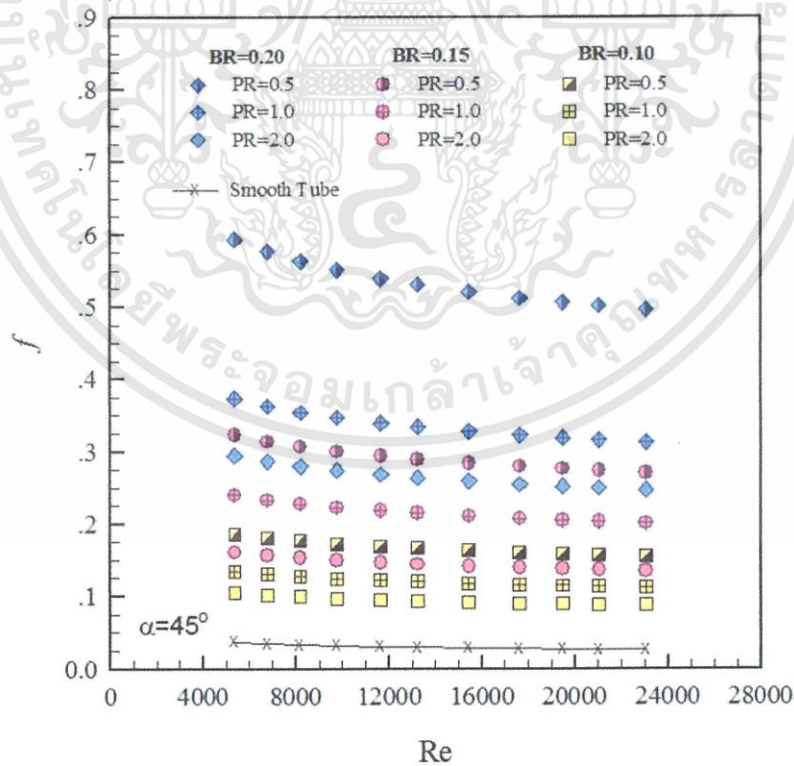


รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีสองท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิทช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30°



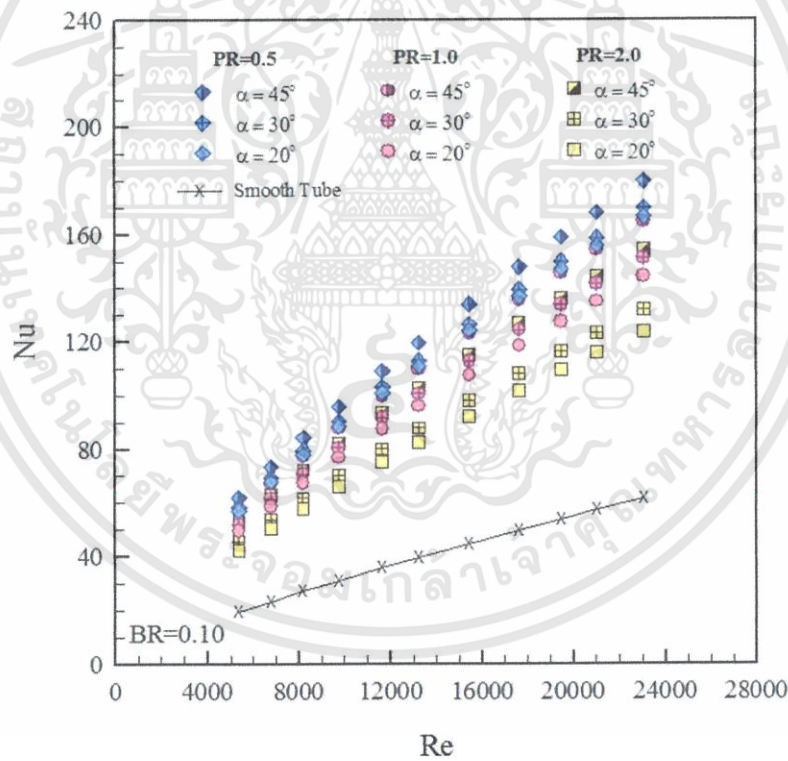
รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิทช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

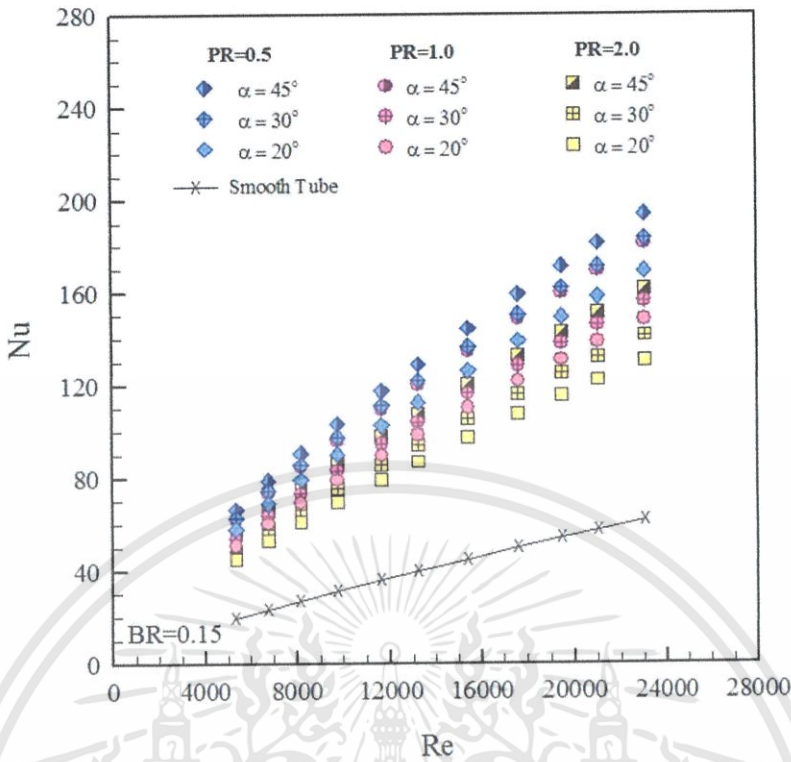
5.3.3 อิทธิพลของอัตราส่วนระยะพิตซ์ที่มีมุมปะทะการไหลเดียวกัน

การเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซิลท์ของกรณีใ้แสงแหวนด้วยวงเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตซ์ต่างๆ ที่มีมุมปะทะการไหล เท่ากับ 20° , 30° และ 45° และการบล็อกการไหล เท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ พบว่ากรณีใ้แสงแหวนด้วยวงเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตซ์เท่ากับ 0.5 จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนระยะพิตซ์เท่ากับ 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ เนื่องจากอัตราส่วนระยะพิตซ์จะส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการไหล โดยอัตราส่วนระยะพิตซ์ที่มีค่าน้อยกว่าจะขัดขวางการไหลได้ดีกว่าซึ่งส่งผลต่อความรุนแรงของความปั่นป่วนของการไหลได้มากกว่า

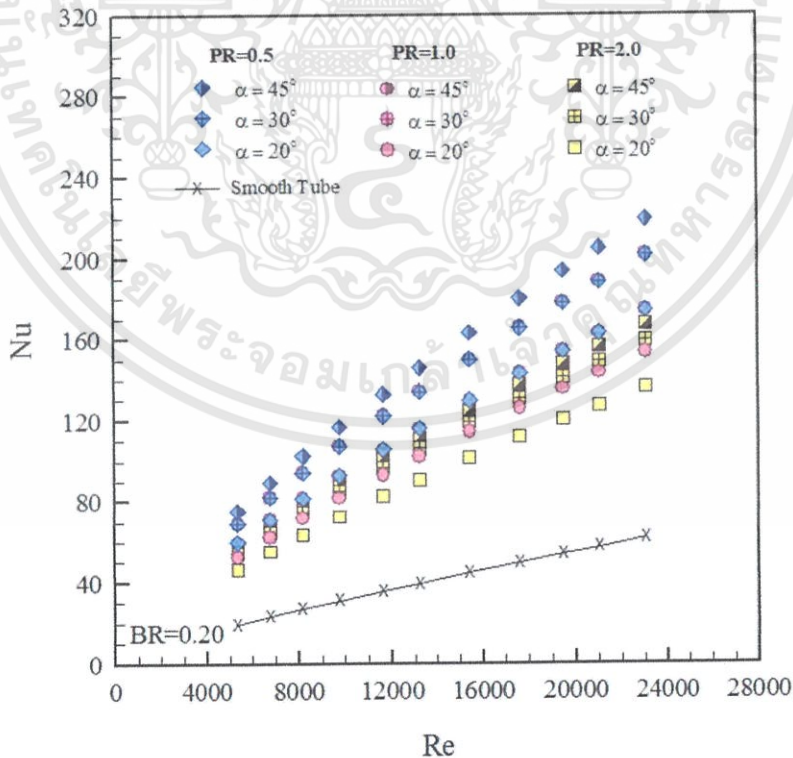
และในการเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานของกรณีใ้แสงแหวนด้วยวงเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตซ์ต่างๆ ที่มีมุมปะทะการไหล เท่ากับ 20° , 30° และ 45° และการบล็อกการไหล เท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ พบว่าค่าตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนระยะพิตซ์ที่มีมุมปะทะการไหลและตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกัน เนื่องจากลักษณะการใ้แสงแหวนด้วยวงเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตซ์มีค่าน้อยกว่าจะขัดขวางกระแสการไหลของของไหลทำงานมากกว่า ทำให้เกิดความดันตกคร่อมที่สูงกว่าจึงส่งผลถึงตัวประกอบความเสียดทานที่สูงกว่าการใ้แสงแหวนด้วยวงเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตซ์มีค่ามากกว่า



รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อใ้แสงแหวนด้วยวงเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตซ์และมุมปะทะการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10

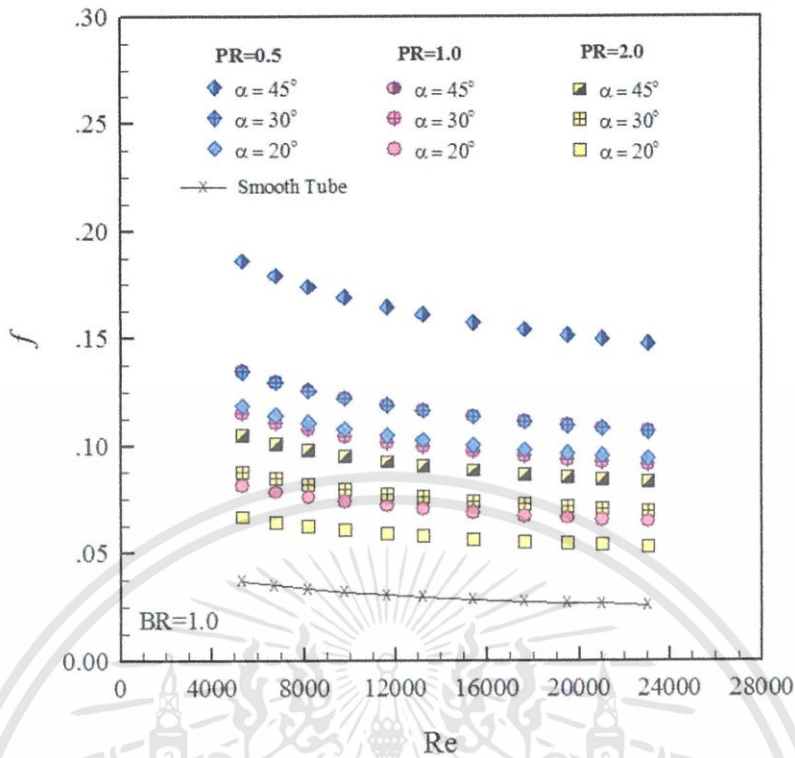


รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียง ที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์และมุมปะทะการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนการบล็อก การไหลเท่ากับ 0.15

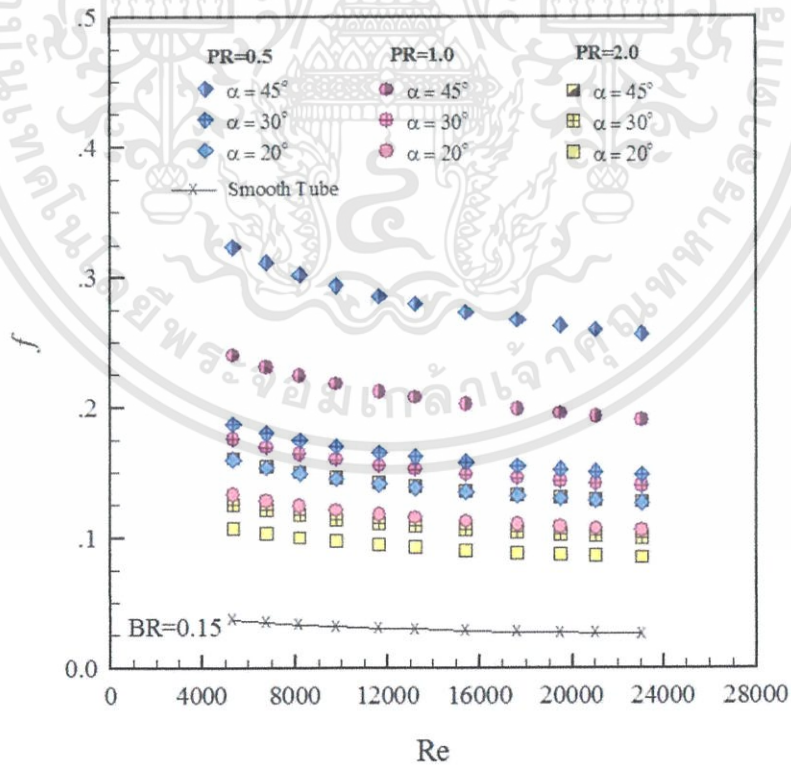


รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียง ที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์และมุมปะทะการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนการบล็อก การไหลเท่ากับ 0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

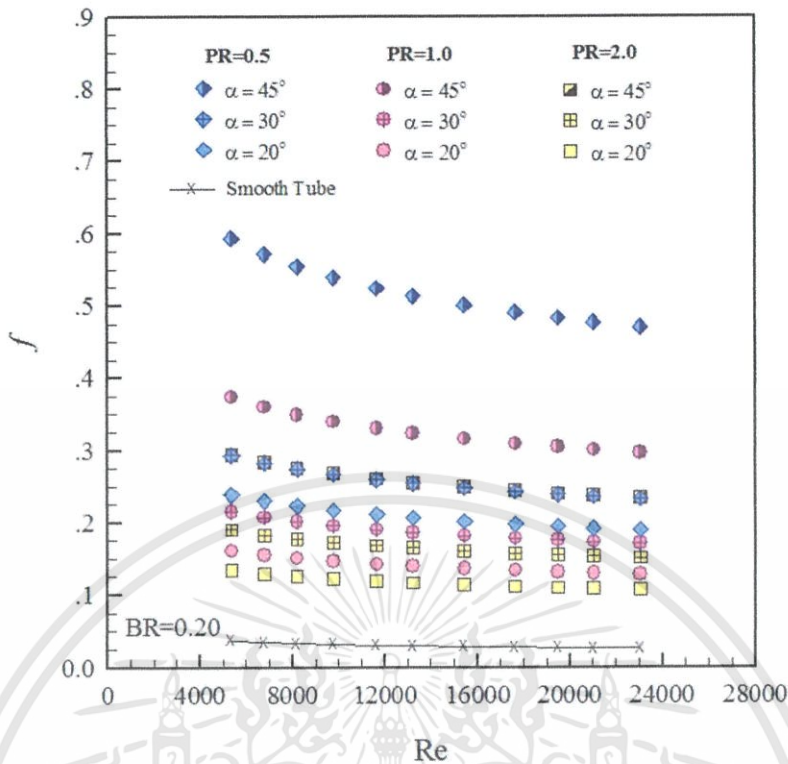


รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตซ์และมุมปะทะการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10



รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตซ์และมุมปะทะการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์และมุมปะทะการไหลต่างๆ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20

5.3.4 เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมของท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงกับท่อผนังเรียบ

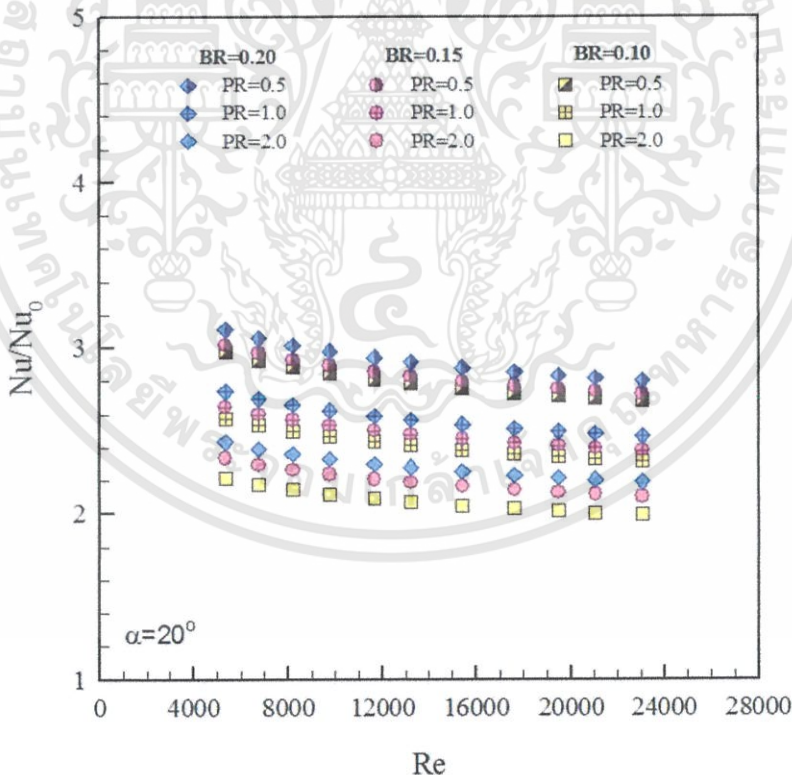
รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขนัสเซิลต์ต่อตัวเลขนัสเซิลต์ของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20° จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลปั่นป่วนวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20 มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 2.94, 2.59 และ 2.30 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15 มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 2.86, 2.50 และ 2.21 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ และสำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10 มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 2.82, 2.44 และ 2.09 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ

รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขนัสเซิลต์ต่อตัวเลขนัสเซิลต์ของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30° จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลปั่นป่วนวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20 มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 3.40, 2.94 และ 2.70 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

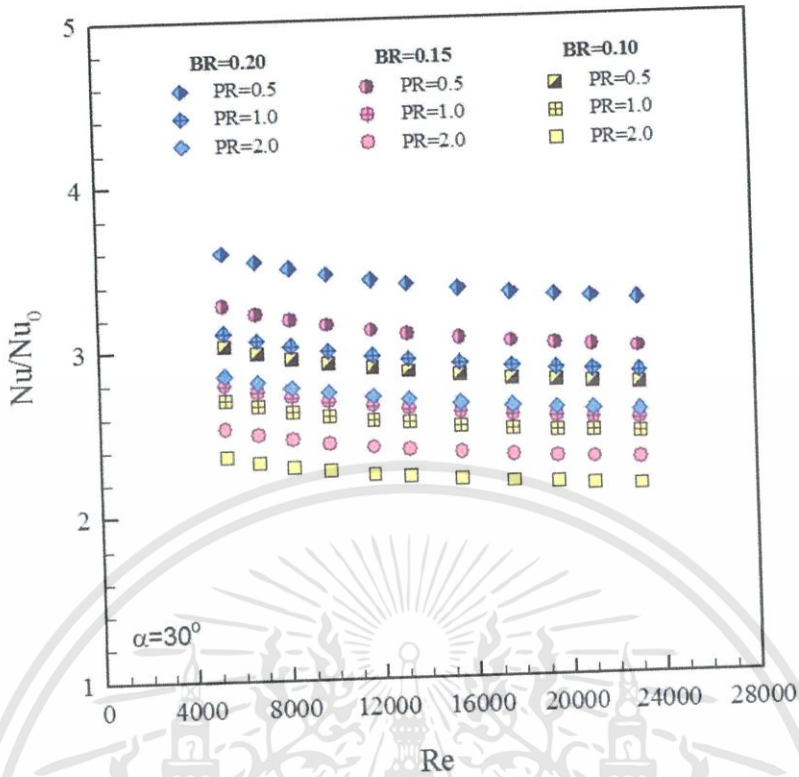
และ 2.0 ตามลำดับ สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15 มีค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 3.10, 2.64 และ 2.39 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ และสำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10 มีค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 2.87, 2.56 และ 2.23 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ

ในรูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขนัสเซิลท์ต่อตัวเลขนัสเซิลท์ของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45° จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลปั่นป่วนวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20 มีค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 3.70, 3.40 และ 2.83 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15 มีค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 3.27, 3.06 และ 2.73 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ และสำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10 มีค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 3.04, 2.79 และ 2.61 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ

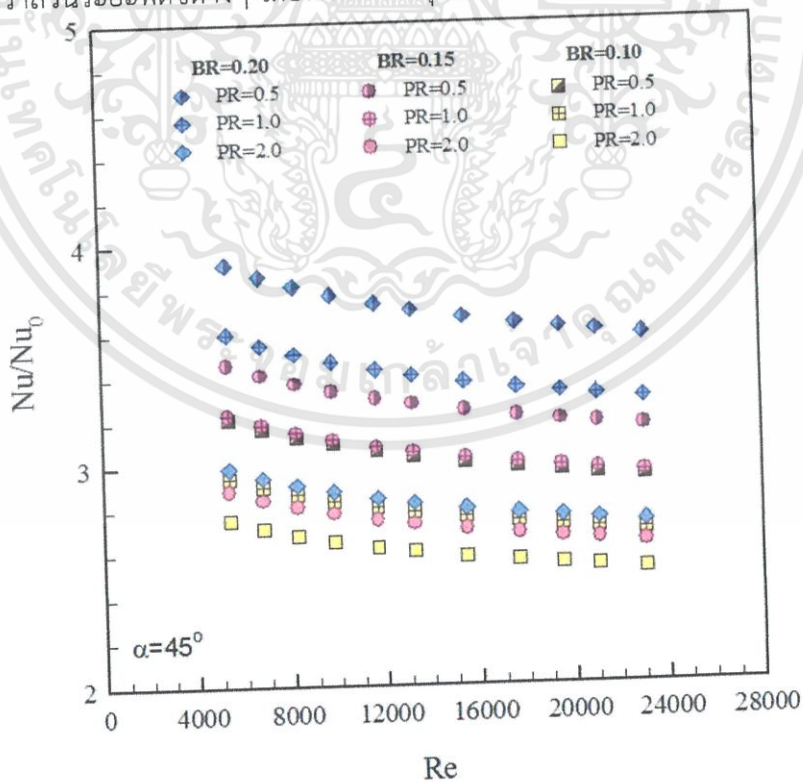


รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขนัสเซิลท์ต่อตัวเลขนัสเซิลท์ของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



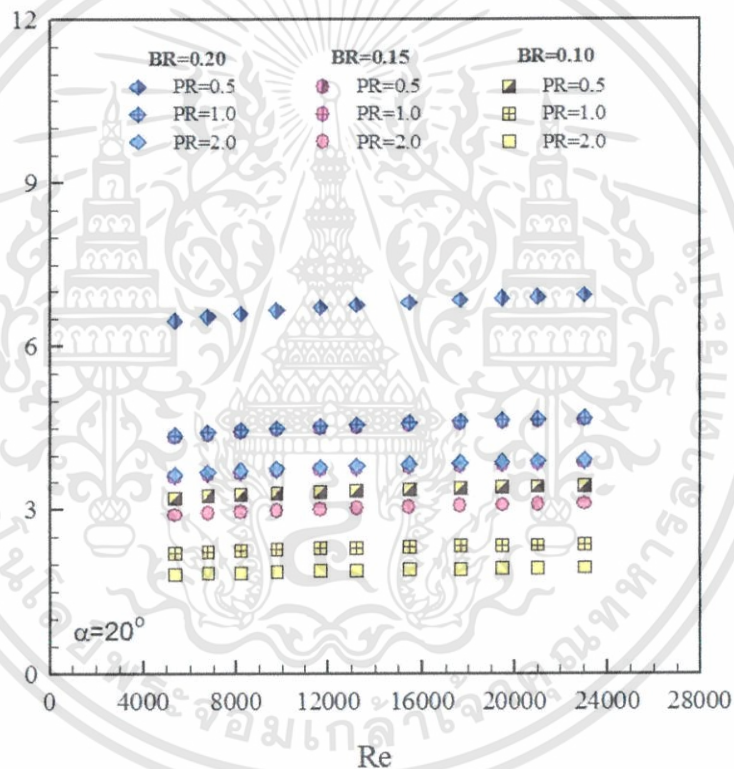
รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขนัสเซิลต์ต่อตัวเลขนัสเซิลต์ของท่อผนังเรียบ กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตซ์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30°



รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขนัสเซิลต์ต่อตัวเลขนัสเซิลต์ของท่อผนังเรียบ กับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตซ์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

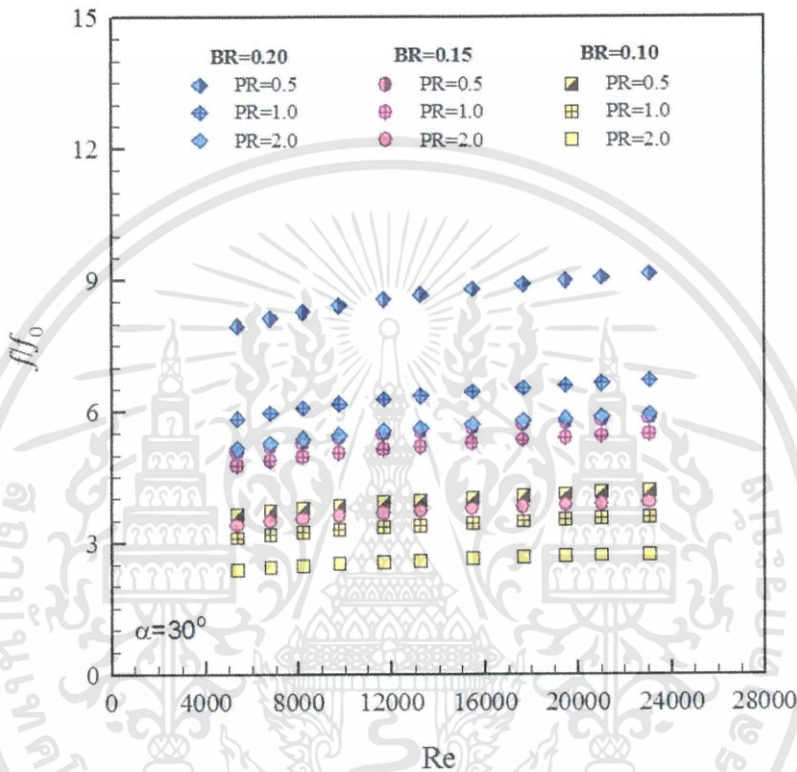
รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานต่อตัวประกอบความเสียดทานของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20° จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลปั่นป่วนวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20 มีค่าตัวประกอบความเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 6.99, 4.72 และ 3.94 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15 มีค่าตัวประกอบความเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 4.68, 3.89 และ 3.13 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ และสำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10 มีค่าตัวประกอบความเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 3.47, 2.38 และ 1.96 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ



รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานต่อตัวประกอบความเสียดทานของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20°

รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานต่อตัวประกอบความเสียดทานของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30° จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลปั่นป่วนวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20 มีค่าตัวประกอบความเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 8.58, 6.30 และ 5.57 เท่า สำหรับวงแหวนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

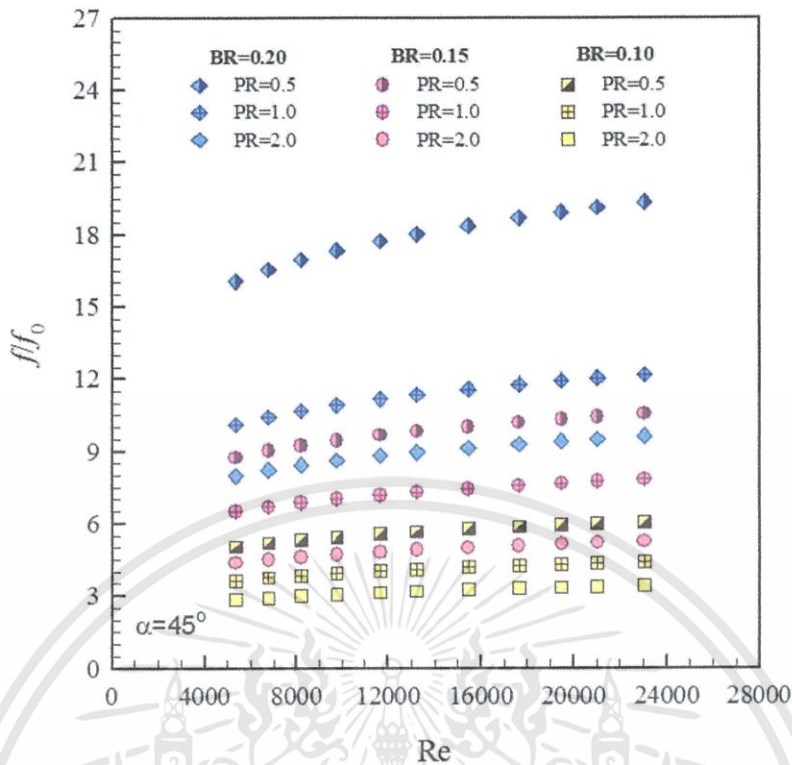
ที่อัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15 มีค่าตัวประกอบความเสียหายเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 5.48, 5.15 และ 3.68 เท่า สำหรับวงแหวนที่อัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ และสำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10 มีค่าตัวประกอบความเสียหายเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 3.93, 3.36 และ 2.57 เท่า สำหรับวงแหวนที่อัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ



รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายต่อตัวประกอบความเสียหายของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30°

รูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายต่อตัวประกอบความเสียหายของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45° จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลปั่นป่วนวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20 มีค่าตัวประกอบความเสียหายเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 17.35, 10.93 และ 8.63 เท่า สำหรับวงแหวนที่อัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15 มีค่าตัวประกอบความเสียหายเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 9.46, 7.02 และ 4.71 เท่า สำหรับวงแหวนที่อัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ และสำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10 มีค่าตัวประกอบความเสียหายเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 5.45, 3.93 และ 3.07 เท่า สำหรับวงแหวนที่อัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ

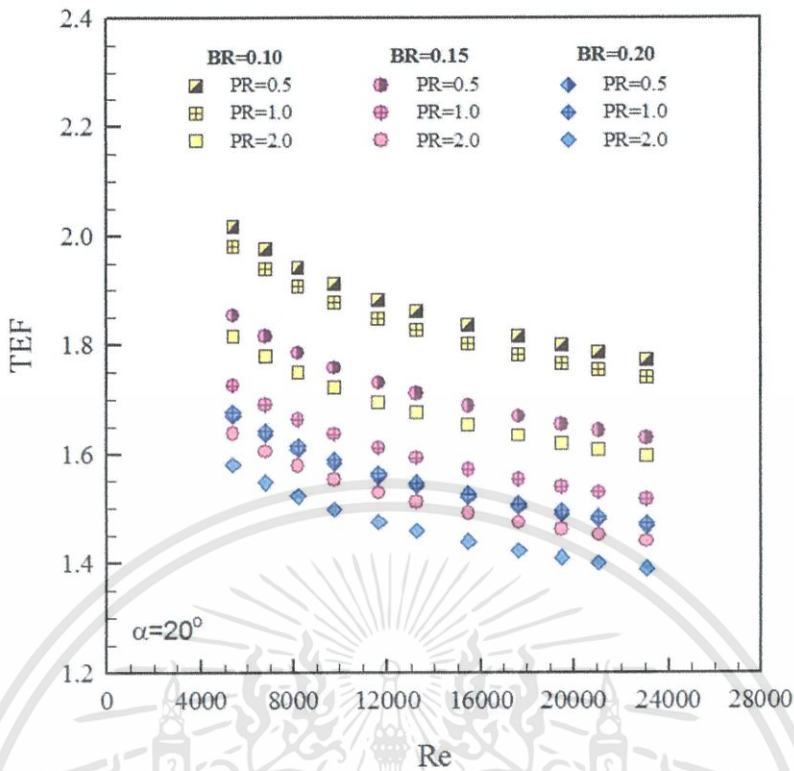
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



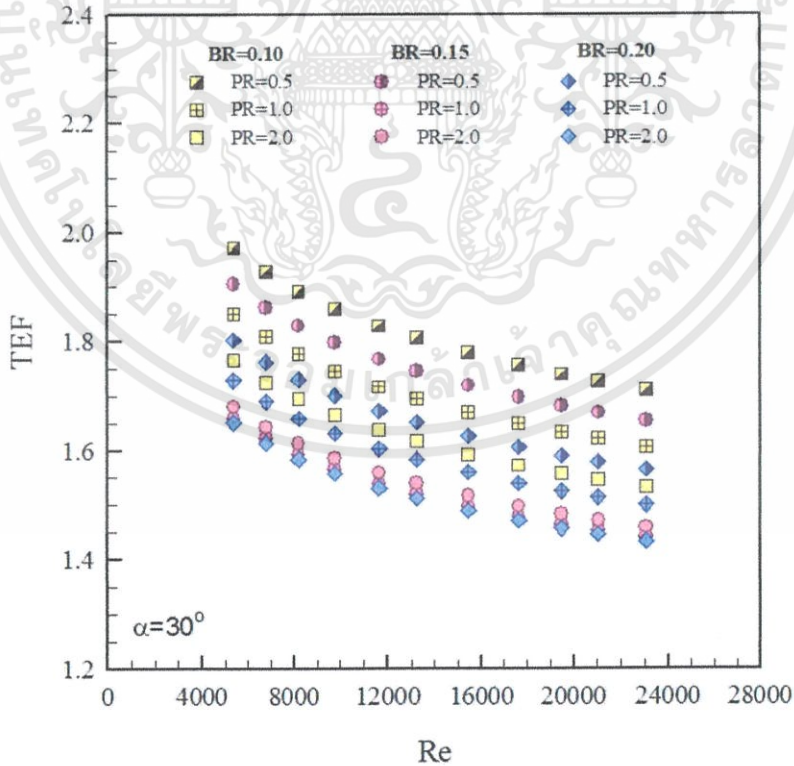
รูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานต่อตัวประกอบความเสียดทานของท่อผนังเรียบกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45°

5.3.5 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Thermal enhancement factor)

รูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20° จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลปั่นป่วนวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10 มีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 1.86, 1.83 และ 1.68 เท่า สำหรับวงแหวนที่อัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15 มีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 1.71, 1.59 และ 1.51 เท่า สำหรับวงแหวนที่อัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ และสำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20 มีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 1.54, 1.55 และ 1.46 เท่า สำหรับวงแหวนที่อัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ



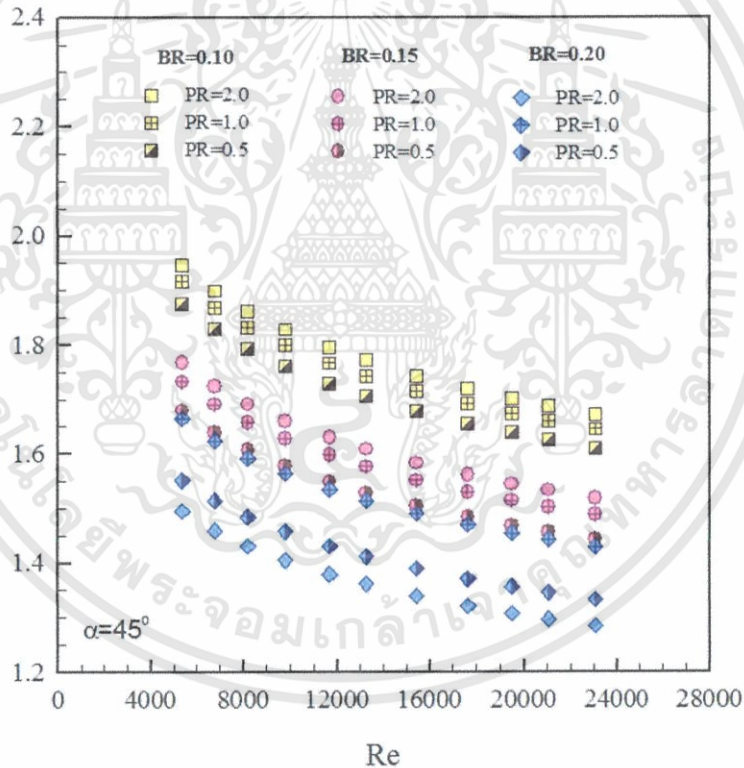
รูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20°



รูปที่ 5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

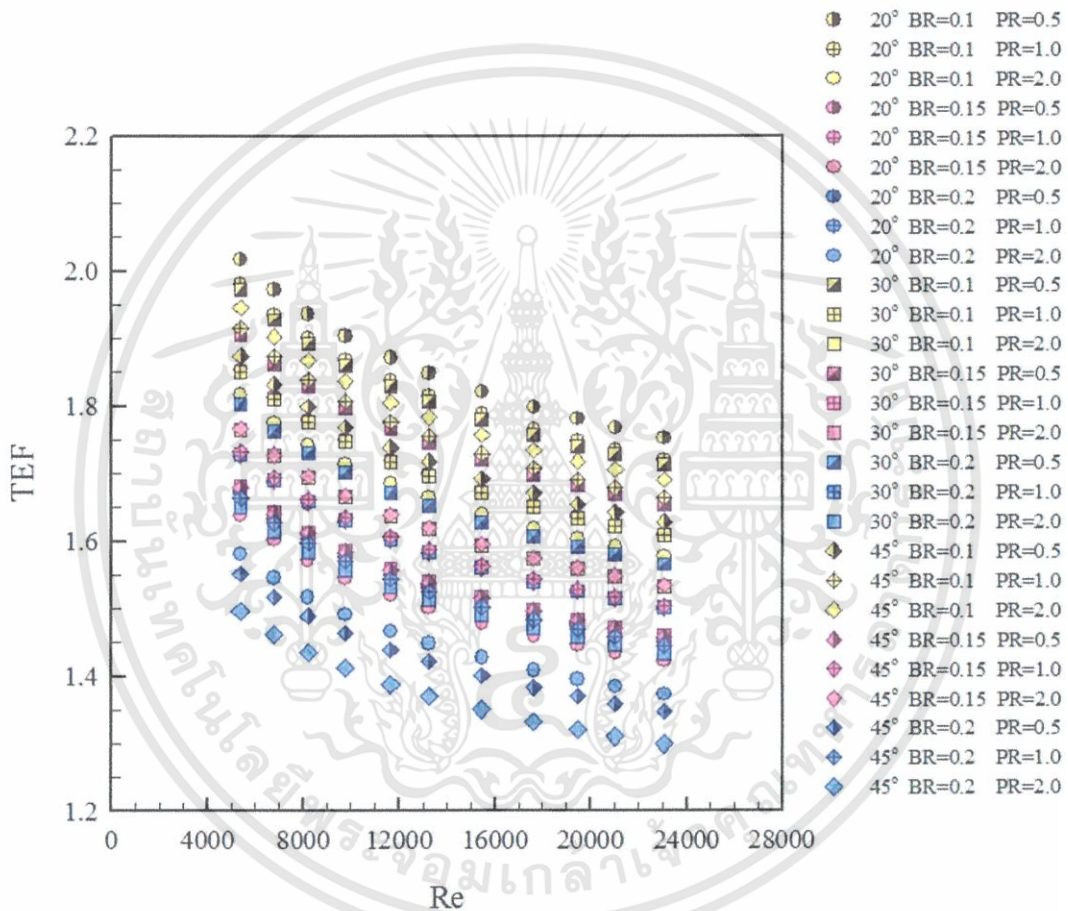
รูปที่ 5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 30° จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลปั่นป่วนวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10 มีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 1.82, 1.71 และ 1.63 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15 มีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 1.76, 1.53 และ 1.55 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ และสำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20 มีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 1.66, 1.59 และ 1.52 เท่า สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ



รูปที่ 5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45°

รูปที่ 5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนตัวยูเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ โดยพิจารณาที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 45° จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลปั่นป่วนวงแหวนที่มีเอกสกรีนนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.10 มีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 1.73, 1.77 และ 1.80 เท่า สำหรับวงแหวนที่อัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ สำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.15 มีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 1.55, 1.60 และ 1.63 เท่า สำหรับวงแหวนที่อัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ และสำหรับวงแหวนที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.20 มีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ 1.43, 1.54 และ 1.38 เท่า สำหรับวงแหวนที่อัตราส่วนระยะพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ



รูปที่ 5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีมุมปะทะการไหล อัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ

รูปที่ 5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อที่ใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีมุมปะทะการไหล อัตราส่วนการบล็อกการไหลและอัตราส่วนระยะพิตช์ต่างๆ จากการทดลองค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดมีค่าประมาณ 2.01 ที่มุมปะทะการไหลเท่ากับ 20° อัตราส่วนการบล็อกการไหลเท่ากับ 0.1 อัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 0.5 ที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 5,300

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อกลมด้วยการใส่วงแหวนด้วยเอียงสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม ของการไหลภายในท่อโดยการใส่วงแหวนด้วยเอียง จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น การใส่วงแหวนด้วยเอียงจะส่งผลดีต่อการถ่ายเทความร้อน 2 ประการคือ ประการแรก จะช่วยทำให้อากาศที่ถูกจ่ายเข้าภายในชุดทดลองเกิดการปั่นป่วนอันเนื่องมาจากวงแหวนด้วยเอียงที่ถูกใส่เข้าไปภายในท่อทำให้อากาศหมุนวนและช่วยพาความร้อนออกจากท่อ ประการที่สอง เป็นการเพิ่มระยะเวลาในการรับความร้อนภายในท่อให้นานมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น แต่ในทางเดียวกันก็เกิดค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการใส่วงแหวนด้วยเอียงไปขวางเส้นทางการไหล จึงเกิดแรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้น

2. การศึกษาความสัมพันธ์ของมุมปะทะการไหลกับการถ่ายเทความร้อน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อเลขเรย์โนลด์์เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าตัวเลขนัสเซิลท์เพิ่มขึ้น และการใส่วงแหวนด้วยเอียงที่ทำมุมปะทะการไหล 20° , 30° และ 45° อัตราส่วนการบล็อกรการไหล (Blockage Ratio, b/D) เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 และอัตราส่วนระยะพิตช์ (Pitch Ratio, P/D) เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 ทำให้ตัวเลขนัสเซิลท์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน กรณีใส่วงแหวนด้วยเอียงมุมปะทะเท่ากับ 45° จะให้ค่าตัวเลขนัสเซิลท์มากที่สุด รองลงมาคือมุมปะทะเท่ากับ 30° และ 20° ตามลำดับ

3. การศึกษาความสัมพันธ์ของระยะความสูงของวงแหวนด้วยเอียงกับการถ่ายเทความร้อน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อเลขเรย์โนลด์์เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าตัวเลขนัสเซิลท์เพิ่มขึ้น และกรณีใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนการบล็อกรการไหลเท่ากับ 0.20 จะให้ค่าตัวเลขนัสเซิลท์มากที่สุด รองลงมาคือมุมปะทะเท่ากับ 0.15 และ 0.10 ตามลำดับ

4. การศึกษาความสัมพันธ์ของระยะห่างของวงแหวนด้วยเอียงกับการถ่ายเทความร้อน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อเลขเรย์โนลด์์เพิ่มขึ้น และกรณีใส่วงแหวนด้วยเอียงที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 0.5 จะให้ค่าตัวเลขนัสเซิลท์มากที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ

5. การศึกษาผลของสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของวงแหวนด้วยเอียง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน กรณีใส่วงแหวนด้วยเอียงที่ทำมุมปะทะการไหลเท่ากับ 20° อัตราส่วนการบล็อกรการไหลเท่ากับ 0.1 และอัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 0.5 ที่เลขเรย์โนลด์์เท่ากับ 5,300 มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 2.01

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองเป็นการทดลองซึ่งได้ทำการศึกษาผลของแผ่นวงแหวนรูปตัวยูเอียง ควรจะมีการศึกษาถึงตัวแปรอื่นๆ เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลมาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสมรรถนะที่ดีได้ เช่น การศึกษาการเยียดขึ้นๆ ศึกษามุมปะทะของไหลอื่นๆ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้คำนึงถึงผลของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเป็นหลัก ซึ่งในแง่การใช้งานจริงในอุตสาหกรรมจะต้องพิจารณาเงื่อนไขการทำงานของระบบ ความเหมาะสม และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] วิษณุ อำไพจิตร. 2552. “การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อแผ่นขนานโดยใช้ครีบบั๊ก.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] R.M.Manglik and A.E. Bergles, 1988. “Laminar flow heat transfer in a semi-circular tube with uniform wall temperature” **Heat Mass Transfer vol.31. 3** : 625-636
- [3] Han, J.C., Zhang, Y.M. and Lee, C.P. 1991. “Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs.” **ASME J. Heat Transfer. 113** : 590-596
- [4] Liou, T.M. and Hwang, J.J. 1992. “Turbulent heat transfer augmentation and friction in periodic fully developed channel flow.” **ASME J. Heat Transfer. 114** : 56-64
- [5] Liou T.M. and Hwang, J.J. 1993. “Effect of ridge shapes on turbulent heat transfer and friction in a rectangular channel.” **Int. J. Heat Mass Transfer. 36** : 931-940
- [6] Han, J.C., Huang, J.J. and Lee, C.P. 1993. “Augmented heat transfer in square channels with wedge-shaped and delta-shaped turbulence promoters.” **J. Enhanced Heat Transfer. 1** : 37-52
- [7] 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
- [8] 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
- [9] S.K.Agarwal and M.Raj Rao, 1996 “Heat transfer augmentation for the flow of a viscous liquid in circular tubes using twisted tape inserts.” **Heat Mass Transfer vol.39. 17** : 3547-3557
- [10] Gentry, M.C. and Jacobi, A.M. 1997. “Heat transfer enhancement by delta-wing vortex generators on flat plate: vortex interactions with the boundary layer.” **Exp. Thermal Fluid Science. 14** : 231-242
- [11] 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.
- [12] S.K. Saha, A.Dutta,S.K.Dhal, 2001 “Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements” **International Journal of Heat and Mass Transfer. 44** : 4211-4223
- [13] S.Ray,AW.Date, 2003 “Friction and heat transfer characteristics of flow through square duct with twisted tape inset.” **International Journal of Heat and Mass Transfer. 46** : 889-902

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Jaurker, A.R., Saini, J.S. and Gandhi, B.K. 2005. "Heat transfer and friction characteristics of rectangular solar air heater duct using rib-grooved artificial roughness." **Solar Energy**. 80(8) : 895-907
- [15] Smith Eiamsa-ard. 2006. "Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regular spaced twisted tape elements." Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok 10530, Thailand
- [16] Alberto Garcí'a. 2007 "Experimental study of heat transfer enhancement with wire coil inserts in laminar-transition-turbulent regimes at different Prandtl numbers." Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Campus de la Muralla del Mar, 30202 Cartagena, Spain.
- [17] Pongjet Promvong. 2007. "Heat transfer augmentation in a circular tube using V-nozzle turbulator inserts and snail entry" Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
- [18] Varun, Saini, R.P. and Singal, S.K. 2007. "A review on roughness geometry used in solar air heaters." **Solar Energy**. 81 : 1340-1350.
- [19] P. Promvong, S. Eiamsa-ard, 2007 "Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted-tape insert" **International Communications in Heat and Mass Transfer** 34. pp. 849 - 859.
- [20] Promvong, P. and Thianpong, C. 2008. "Thermal performance of turbulent channel flows over different shaped ribs." **Int. Common. Heat Mass Transfer**. 35 : 1327-1334.
- [21] Sripattanapipat, S. and Promvong, P. 2009. "Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles." **Int. Comm. Heat Mass Transfer**. 36 : 32-38
- [22] V. Kongkai-paiboon, K. Nanan, S. Eiamsa-ard, 2010 "Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators", **International Communications in Heat and Mass Transfer** 37. 5 : 568-574



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

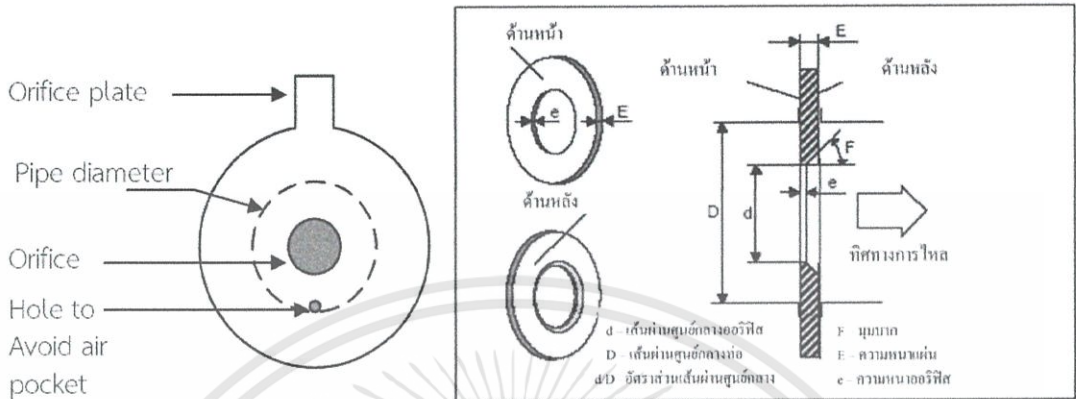
T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg K)	$\mu \times 10^7$ (N s/ m ³)	ν (m ² /s)	$k \times 10^6$ (W/m K)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	Pr
100	3.25562	1.032	71.1	2.0	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.59	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	22.5	0.707
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



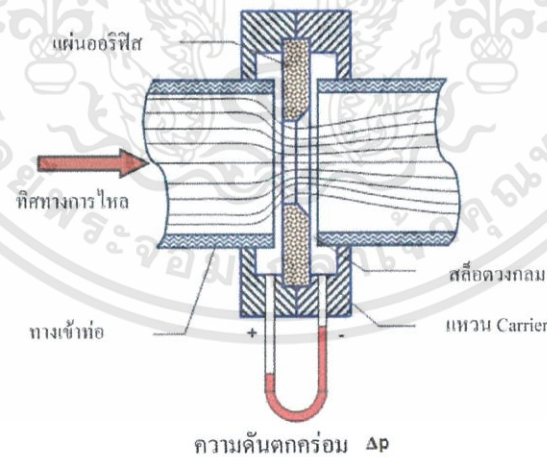
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออริฟิสชนิดต่าง ๆ คล้ายคลึงกัน สามารถอธิบายด้วยกันได้ แต่ละชนิดแตกต่างกันที่ pressure tapping ซึ่ง orifice มาตรฐานกำหนดดังนี้ รูปร่างลักษณะ (description) ออริฟิส (orifice) ได้ แสดงหน้าตัดต่าง ๆ ดังรูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 Standard orifice plate

แผ่นออริฟิสเป็นแผ่นบางๆ ที่ถูกจับยึดระหว่างขอบของท่อ เนื่องจากมีรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่าย ๆ ดังนั้นจึงมีราคาถูก และง่ายในการติดตั้ง หรือการย้ายตำแหน่ง แต่อย่างไรก็ตามขอบของแผ่นอาจจะมีการสึกกร่อนได้ อันเนื่องจากการชนของอนุภาคเล็ก ๆ ที่กระจายอยู่ในของไหล ข้อเสียอีกประการ คือ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการขยายของด้านล่างของกระแส ทำให้มี head loss ถาวรที่สูงมาก จุดวัดความดันสำหรับออริฟิสนั้น สามารถกำหนดตำแหน่งได้หลายตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ ข-2 เนื่องจากตำแหน่งของจุดวัดความดันมีอิทธิพลต่อการหาสัมประสิทธิ์การไหล

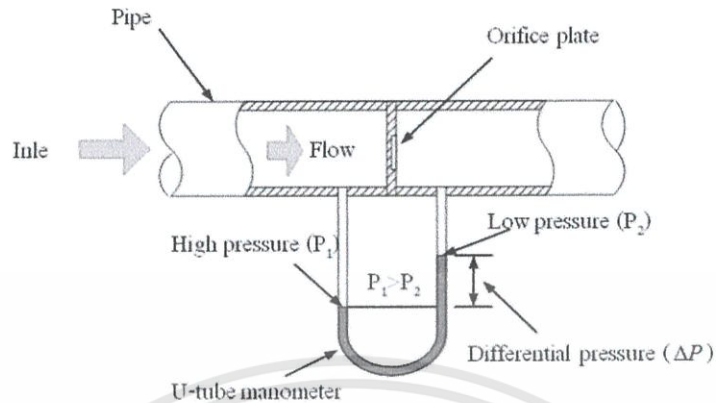


รูปที่ ข-2 โครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิส

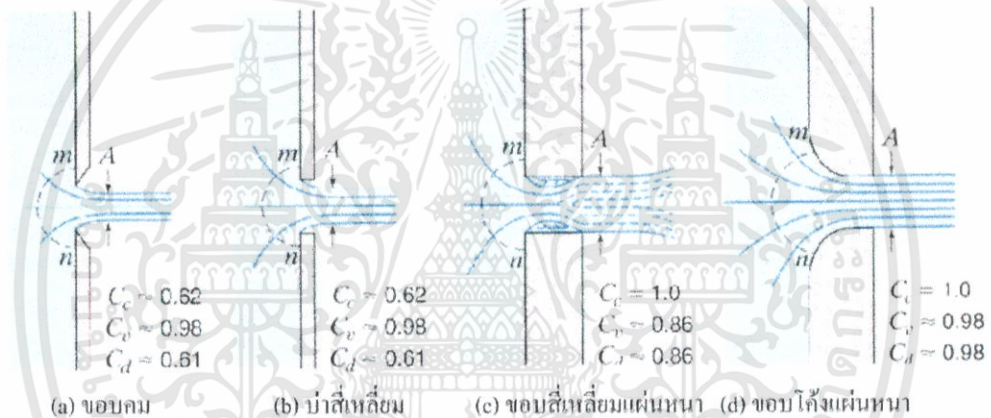
สำหรับการวัดอัตราการไหลของของไหลภายในท่อ และจัดได้ว่าออริฟิสเป็นเครื่องมือวัดที่กีดขวางการไหลของพื้นที่หน้าตัด ให้ของไหลไหลผ่านออริฟิสมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังแสดงในรูปที่ ข-3 ดังนั้นเมื่อนำออริฟิสไปติดตั้งกับท่อ ซึ่งมีของไหลไหลผ่านจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมออริฟิส ซึ่งความดันตกคร่อมนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการไหล กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลมีค่าสูง ความดันตกคร่อมออริฟิสก็จะมีค่าสูง และถ้าอัตราการไหลมีค่าต่ำ ความดันตกคร่อมออริฟิสก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปออริฟิสจะถูกนำไปใช้ในการหาอัตราการไหลที่สภาวะ Steady state เท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้วัดอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Dynamic Response)



รูปที่ ข-3 การไหลผ่านแผ่นออริฟิส



รูปที่ ข-4 ออริฟิสแบบต่าง ๆ

ในบรรดาเครื่องมือวัดอัตราการไหลทั้งหลาย ออริฟิสถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีผู้นำไปใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด ดังนั้นการทดลองชุดนี้จึงได้มีการนำเอาการวัดอัตราการไหลแบบออริฟิสมาใช้ออริฟิสมาตรฐานที่มีขอบคม ดังแสดงในรูปที่ ข-4 (a) หรือเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ ข-4 (b) นั้นจะสัมพันธ์ลำน้ำที่ไหลผ่านในลักษณะที่เป็นการสัมพันธ์แบบเส้น ส่วนออริฟิสดังรูปที่ ข-4 (c) และ ข-4 (d) นั้นไม่ใช้เป็นออริฟิสมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะลำน้ำที่ไหลผ่านรูออริฟิสนั้น ถูกกระทบจากความหนาของแผ่นวัดตุ้ กับความหยาบของผิว และรัศมีของความโค้ง ดังนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบเพื่อความถูกต้อง

ข้อดีของออริฟิส คือ มีราคาต่ำกว่าเครื่องมือวัดชนิดอื่น ๆ ที่อาศัยหลักการวัดเดียวกัน และสะดวกในการสร้างเพราะมีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อน รวมทั้งมีข้อมูลของการทำวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมในการวัดของไหล ที่มีเงื่อนไขแตกต่างกันอย่างมากมาย ของไหลเมื่อไหลผ่าน square-edged orifice ซึ่งเป็นออริฟิสที่นำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ จะมีทิศทางการไหลเป็นไปดังรูป สมมุติว่าของไหลก่อนเข้าปะทะกับออริฟิส มีความเร็วคงที่ตลอดหน้าตัดของท่อ (หน้าตัดวงกลม) เท่ากับ V_1 เมตรต่อวินาที ของไหลที่บริเวณด้านหลังของออริฟิส จะมีลักษณะเป็นลำของไหล ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำของไหลลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ $D/2$ เมตร ณ บริเวณจุดวัดความดันที่ 2 ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดที่มีพื้นที่หน้าตัดของการไหลน้อยที่สุด (Vena Contracta) ของ Jet ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jet จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ 2 ไปแล้ว จุดที่ 2 หรือเรียกว่าจุด Vena Contracta ถือได้ว่าเป็นจุดที่ของไหลที่มีความเร็วเฉลี่ยสูงสุด หรือมีความดันสถิตย์ต่ำสุด (จากสมการของ Bernoulli)

สมมติฐานเบื้องต้นสำหรับการวัดอัตราการไหลด้วยออริฟิสในการทดลองนี้ คือ ของไหลที่อยู่ภายในท่อไม่สามารถอัดตัวได้ ความเร็วของของไหลมีค่าคงที่ตลอดหน้าตัด (โดยไม่คิดบริเวณที่เรียกว่า บริเวณกระแสไหลวน) ของไหลไม่มีความหนืด และการไหลเกิดขึ้นแบบ Steady flow (อัตราการไหลมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลา)

สมการ Bernoulli สามารถนำมาใช้อธิบายคุณสมบัติในการไหลที่จุดใด ๆ ภายในท่อได้ โดยสมการ Bernoulli สำหรับจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของการไหล แสดงในรูปที่ ข-3 สามารถคำนวณหาค่าอัตราการไหลเมื่อติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบออริฟิส 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 ความดันสถิตย์ของของไหล (N/m^2)
 - ρ คือ น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight, N/m^3)
 - d_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรูออริฟิส
 - D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ