

การศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน
ในท่อทรงกระบอกที่มีแผ่นกั้นแบบเจาะรู



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน
ในท่อทรงกระบอกที่มีแผ่นกั้นแบบเจาะรู



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Experimental Investigation of Convective Heat Transfer and Pressure
Loss in Cylindrical Tube with Perforated Plate Inserts.



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

การศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน
ในท่อทรงกระบอกที่มีแผ่นกั้นแบบเจาะรู

โดย

นายณัฐวัตร วิรุฬห์สุนทรกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ

(อ.บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)



.....กรรมการ

(รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)



.....กรรมการ

(ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน ในท่อทรงกระบอกที่มีแผ่นกั้นแบบเจาะรู
โดย	นายณัฐวัตร วิรุฬห์สุนทรกุล
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ. บุญชัย โชติวิริยวานิชย์

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานของอากาศภายในท่อ โดยการติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรูภายในท่อเพื่อสร้างความปั่นป่วนให้กับกระแสของของไหลภายในท่อ โดยมีการศึกษาตัวแปรสองตัวแปร คือรูปทรงของแผ่นกั้นซึ่งแสดงผ่านค่าร้อยละของอัตราส่วนของพื้นที่ที่ถูกเจาะต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของท่อ (PR) เป็น 49% และ 36% และอีกตัวแปรหนึ่งคือระยะห่างของแผ่นกั้นเจาะรูแต่ละแผ่นต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (PI) เป็น 1 2 และ 3 โดยทำการทดลองในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 ถึง 25,000 โดยใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน ในการทดลองนี้ใช้ความยาวของท่อส่วนทดลอง 1.2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร ท่อส่วนทดลองถูกให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในการทดลองนี้ เมื่อใช้ระยะห่างแผ่นกั้นและอัตราส่วนช่องเปิดที่ทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 1.1 เท่าที่ระยะห่างแผ่นกั้นที่สั้นที่สุด (PR=1) และอัตราส่วนช่องเปิด 49 เปอร์เซ็นต์ (PI=49%)

Report Title	Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in cylindrical tube with perforated plate inserts
By	Mr. Nattawat Virunsunthornkul
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Advisor	Mr. Boonchai Chotiviriyavanich

ABSTRACT

This work presents an experimental study on heat transfer coefficient enhancement and friction factor by insertion of the perforated plate in cylindrical tube. The parameters used for the experimentation include, perforation index (PI=49% and 36%) and pitch ratio (PR=1, 2 and 3). The experiments were conducted in a circular tube in turbulent flow regime with Reynolds number ranging from 5,000 to 25,000 using air as the working fluid. The experimentation is carried out in the test section of 1.2 m length with diameter of 50.8 mm. The test section was heated with constant heat flux. On experimentation, it is found that, there is 1.1 times improvement in thermal performance factor for PI=49% and PR=1 as compared to smooth tube heat exchangers.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคลากรหลายฝ่าย ทางผู้จัดทำขอขอบคุณอาจารย์บุญชัย โชติวิริยวานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาในการทำงานวิจัยนี้ด้วยดีตลอด

ขอบคุณรศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา ที่ได้ให้คำปรึกษาและแสดงแนวทางในการแก้ปัญหา

ขอบคุณคุณเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ และคุณพิสันต์ ผลโพธิ์ ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในเรื่องการทดลอง

ขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในด้านวิชาการ คำปรึกษา และช่วยเหลือในด้านต่างๆตลอดเวลาที่ศึกษาอยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สุดท้ายนี้ทางผู้จัดทำขอขอบคุณบุพการี และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ช่วยอบรมสั่งสอนและให้การศึกษาก่อเข้าพ่ารวมทั้งรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาและกำลังใจในการเรียนและการทำงานมาโดยตลอด

ณัฐวัตร วิรุฬห์สุนทรกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 การไหลในท่อ.....	4
2.2 ชั้นขอบเขต (Boundary layer).....	4
2.2.1 ช่วงปรับตัวเต็มที่ทางไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamically fully developed).....	4
2.2.2 ช่วงปรับตัวเต็มที่ทางความร้อน (Thermally fully developed).....	5
2.3 ตัวประกอบความเสียดทานในการไหลปรับตัวเต็มที่.....	6
2.4 การถ่ายเทความร้อน.....	7
2.4.1 ความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างผิวท่อกับของไหลภายในท่อ.....	7
2.4.2 ความร้อนที่ของไหลได้รับ.....	8
2.5 สหสัมพันธ์การพาความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อช่วงปรับตัวเต็มที่.....	8
2.6 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนในท่อ.....	8
2.7 แนวทางในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน.....	8
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 อุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	13
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	13
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	13
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	16
3.4.1 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	16
3.4.2 การหาค่าตัวประกอบความเสียดทาน.....	16
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล	17
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	18
4.1 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ	18
4.1.1 ผลของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อการการถ่ายเทความร้อน.....	18
4.1.2 ผลของอัตราส่วนช่องเปิดแผ่นกั้นต่อการถ่ายเทความร้อน	19
4.1.3 ภาพรวมการถ่ายเทความร้อน	21
4.1.4 การเทียบผลการทดลองกับสมการสหสัมพันธ์การพาความร้อนของการไหลแบบ- ปั่นป่วนช่วงปรับตัวเต็มที่.....	22
4.2 ผลการทดลองด้านการสูญเสียความดันภายในท่อ	22
4.2.1 ผลของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อความดันลดภายในท่อ	22
4.2.2 ผลของอัตราส่วนช่องเปิดแผ่นกั้นต่อความดันลดภายในท่อ	24
4.2.3 ภาพรวมการถ่ายเทความร้อน	26
4.2.4 การเทียบผลการทดลองกับสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบความเสียดทาน	27
4.3 ผลการทดลองด้านสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ.....	27
4.3.1 อัตราส่วนเลขนัสเซิลของท่อที่ใส่แผ่นกั้นต่อเลขนัสเซิลของท่อเปล่า.....	27
4.3.2 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานของท่อที่ใส่แผ่นกั้นต่อตัวประกอบความเสียด- ทานของท่อเปล่า.....	28
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์	29
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	32
บรรณานุกรม.....	33
ภาคผนวก.....	34
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการคำนวณออกแบบการทดลอง	35
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน.....	39
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลองด้านความดันลด	42

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางไฮโดรไดนามิกส์ช่วงการไหลแบบราบเรียบในท่อทรงกระบอก	4
2.2 การก่อตัวของชั้นขอบเขตของทางความร้อนช่วงการไหลแบบราบเรียบในท่อทรงกระบอก	5
2.3 ตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลปรับตัวเต็มที่ในท่อทรงกระบอก	6
2.4 การไหลของของไหลผ่านท่อที่มีการให้ความร้อนแบบพลิกซังที่	7
2.5 โครงสร้างการไหลสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อ	10
3.1 แผนภาพการสร้างชุดทดลอง	14
3.2 แผ่นกั้น	15
4.1 กราฟเปรียบเทียบนัสเซิลที่ระยะห่างของแผ่นกั้นต่างกัน อัตราส่วนช่องเปิด 36%	19
4.2 กราฟเปรียบเทียบนัสเซิลที่ระยะห่างของแผ่นกั้นต่างกัน อัตราส่วนช่องเปิด 49%	19
4.3 กราฟเปรียบเทียบเลขนัสเซิลที่อัตราส่วนช่องเปิด 36% และ 49% อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 1	20
4.4 กราฟเปรียบเทียบเลขนัสเซิลที่อัตราส่วนช่องเปิด 36% และ 49% อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 2	20
4.5 กราฟเปรียบเทียบเลขนัสเซิลที่อัตราส่วนช่องเปิด 36% และ 49% อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 3	21
4.6 กราฟภาพรวมเลขนัสเซิล	21
4.7 เปรียบเทียบเลขนัสเซิลจากการทดลองกับสมการ	22
4.8 กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานที่ระยะห่างของแผ่นกั้นต่างกัน อัตราส่วนช่องเปิด 36%	23
4.9 กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานที่ระยะห่างของแผ่นกั้นต่างกัน อัตราส่วนช่องเปิด 49%	24
4.10 กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานที่อัตราส่วนช่องเปิด 36% และ 49% อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 1	25
4.11 กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานที่อัตราส่วนช่องเปิด 36% และ 49% อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 2	25
4.12 กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานที่อัตราส่วนช่องเปิด 36% และ 49% อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 3	26
4.13 ภาพรวมตัวประกอบความเสียดทาน	26
4.14 เปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานจากการทดลองกับสมการ	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 อัตราส่วนเลขนัยสเกลต่อเลขนัยสเกลในท่อเปล่า	28
4.16 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานต่อตัวประกอบความเสียดทานในท่อเปล่า.....	29
4.17 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ระยะห่างของแผ่นกั้นต่างๆ อัตราส่วน- ช่องเปิด 49%.....	30
4.18 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ระยะห่างของแผ่นกั้นต่างๆ อัตราส่วน- ช่องเปิด 36%.....	30
4.19 ภาพรวมสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน	31



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ก.1 ขนาดและความยาวท่อจากงานวิจัยต่างๆ	38
ข.1 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=36% PR=1.....	39
ข.2 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=49% PR=1.....	39
ข.3 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=36% PR=2.....	40
ข.4 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=49% PR=2.....	40
ข.5 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=49% PR=3.....	40
ข.6 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=49% PR=3.....	41
ค.1 ผลการทดลองด้านความดันลด แผ่นกั้น PI=36% PR=1.....	42
ค.2 ผลการทดลองด้านความดันลด แผ่นกั้น PI=49% PR=1.....	42
ค.3 ผลการทดลองด้านความดันลด แผ่นกั้น PI=36% PR=2.....	42
ค.4 ผลการทดลองด้านความดันลด แผ่นกั้น PI=49% PR=2.....	43
ค.5 ผลการทดลองด้านความดันลด แผ่นกั้น PI=36% PR=3.....	43
ค.6 ผลการทดลองด้านความดันลด แผ่นกั้น PI=49% PR=3.....	43

สัญลักษณ์

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ

A_s	พื้นที่ผิวภายในของท่อ (m^3)
c_p	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ($J/kg\cdot K$)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
f	ตัวประกอบความเสียดทาน
f_0	ตัวประกอบความเสียดทานของท่อเปล่า
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2)
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล ($W/m\cdot K$)
L	ความยาวท่อ (m)
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
Nu	เลขนัสเซิล
Nu_0	เลขนัสเซิลของท่อเปล่า
PI	อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดของแผ่นกั้นต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อ (%)
PR	อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
Pr	เลขพลินด์เทิล
Δp	ความดันลด (Pa)
\dot{q}	อัตราการถ่ายเทความร้อน (J/s)
Re_D	เลขเรย์โนลด์
T_b	อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่ไหลภายในท่อ ($^{\circ}C$)
$T_{m,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศขาเข้า ($^{\circ}C$)
$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศขาออก ($^{\circ}C$)

สัญลักษณ์(ต่อ)

T_s	อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นที่ผิวของท่อ ($^{\circ}\text{C}$)
u_m	ความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในท่อ (m/s)
x	ระยะตามความยาวท่อ (m)
$x_{fd,h}$	ความยาวช่วงปรับตัวทางไฮโดรไดนามิกส์ (m)
$x_{fd,t}$	ความยาวช่วงปรับตัวทางความร้อน (m)

ตัวอักษรภาษากรีก

ρ	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
μ	ความหนืดสมบูรณ์ของอากาศ ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)
η	สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นเครื่องมือที่ใช้ถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหล เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญและใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมมากมาย โดยส่วนใหญ่แล้วทำหน้าที่ทั้งในการนำพลังงานความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ เช่น การนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้ใหม่ การให้ความร้อนกับของไหลและการหล่อเย็น เป็นต้น ในบางกรณีที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ เช่น กรณีที่เป็นการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศ ซึ่งสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าต่ำ ถ้าสามารถทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานที่ใช้เพิ่มความร้อนลงได้

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีส่วนประกอบที่เป็นท่อทรงกระบอก เพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลภายในท่อ วิธีในการการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของท่อกับของไหลที่ไหลในท่อ ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อน (Fins) หรือการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการใส่แผ่นกั้น (Turbulator) ซึ่งแผ่นกั้นจะทำให้การไหลของของไหลมีความปั่นป่วนและเกิดการผสมกันมากขึ้น ในที่นี้จะศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยทำการติดตั้งแผ่นกั้นขวางการไหลภายในท่อตลอดเส้นทางการไหลเพื่อให้การไหลเกิดการผสมกัน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นวิธีทั่วไปที่ใช้บริเวณชั้นขอบเขตทางความร้อน (thermal boundary layer) แต่ทั้งนี้ก็จะก่อให้เกิดแรงเสียดทานภายในท่อด้วย

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งแผ่นกั้นภายในท่อ และศึกษาความสัมพันธ์ของระยะห่างของแผ่นกั้นแต่ละแผ่นภายในท่อกับการถ่ายเทความร้อน ซึ่งแผ่นกั้นจะส่งผลถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนและความดันลดที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับผิวท่อทรงกระบอกที่มีการใส่แผ่นกั้นที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นและอัตราส่วนช่องเปิดต่างกัน เทียบกับกรณีที่ไม่ใส่แผ่นกั้น
2. เพื่อศึกษาผลของความดันลดภายในท่อทรงกระบอกที่มีการใส่แผ่นกั้นที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นและอัตราส่วนช่องเปิดต่างกัน เทียบกับกรณีที่ไม่ใส่แผ่นกั้น

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ทดลองโดยใช้อากาศในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 ถึง 25,000
2. ทดลองกับท่อทรงกระบอกที่มีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่
3. ศึกษาผลของระยะห่างของแผ่นกั้น ซึ่งแสดงในรูปของอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (PR) ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและความดันลดของอากาศภายในท่อ โดยศึกษาที่ PR เป็น 1 2 และ 3
4. ศึกษาอัตราส่วนช่องเปิดของแผ่นกั้น (PI) ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและความดันลดของอากาศภายในท่อ โดยศึกษาที่ PI เป็น 36% และ 49%

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับแนวทางการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้ของไหลภายในท่อ
2. เพิ่มความเข้าใจในการออกแบบการทดลองภายใต้เงื่อนไขต่างๆ
3. ผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อน

บทที่ 2

ทฤษฎี

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน แบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection)

- การพาความร้อนแบบอิสระ คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีแรงกระทำจากภายนอกที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่
- การพาความร้อนแบบบังคับ คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของแข็งโดยแรงกระทำจากภายนอก เช่น พัดลม เครื่องสูบน้ำ หรือเครื่องเป่าอากาศ

ในการทดลองนี้ได้ทำศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลจะอาศัยแรงกระทำจากเครื่องเป่าอากาศ ซึ่งการพาความร้อนแบบบังคับนั้น ลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหล จะมีผลมากต่อพาความร้อน ในทางตรงกันข้าม การถ่ายเทความร้อนจะมีผลน้อยต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหล

2.1 การไหลในท่อ

การไหลในท่อทรงกระบอกผิวเรียบจะมีลักษณะการไหลขึ้นอยู่กับกลุ่มตัวแปรไร้นิติที่เรียกว่า เลขเรย์โนลด์ (Re_D) โดยที่การไหลที่เลขเรย์โนลด์ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2,300 ลักษณะของการไหล จะเรียงตัวเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกรูปแบบนี้ว่า การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และเมื่อเลขเรย์โนลด์ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4,000 การไหลจะมีลักษณะยุ่งเหยิง ซึ่งเรียกรูปแบบนี้ว่า การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) เลขเรย์โนลด์สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Re \equiv \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (2.1)$$

Re คือ เลขเรย์โนลด์

u_m คือ อัตราเฉลี่ยของอากาศภายในท่อ

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

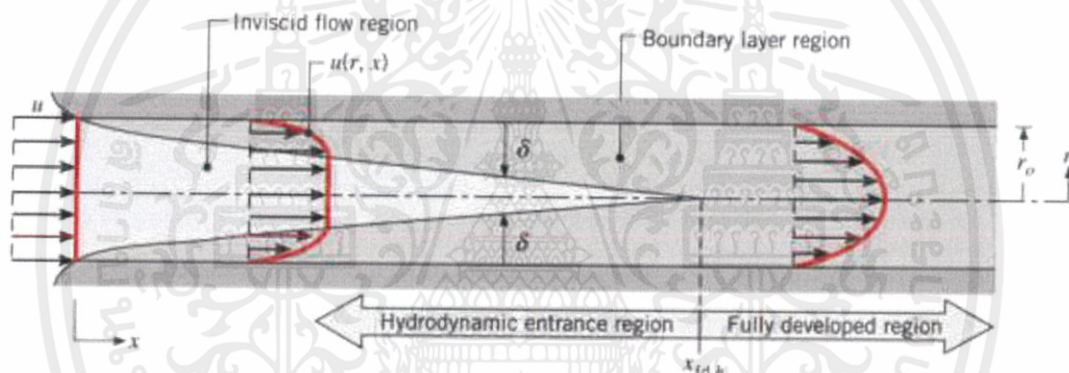
μ คือ ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล

2.2 ชั้นขอบเขต (Boundary layer)

การไหลของของไหลภายในท่อจะเกิดการก่อตัวของชั้นขอบเขต (Boundary layer) ซึ่งชั้นขอบเขตจะเป็นบริเวณที่มี Velocity gradient หรือ Temperature gradient ชั้นขอบเขตจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามความยาวของท่อจนกระทั่งเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อ ระยะความยาวท่อหลังจากชั้นขอบเขตเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อจะเรียกว่าช่วงปรับตัวเต็มที่ (Fully develop) ช่วงปรับตัวเต็มที่ จะสามารถแบ่งได้เป็นสองรูปแบบ คือช่วงปรับตัวเต็มที่ทางไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamically-fully developed) และช่วงปรับตัวเต็มที่ทางความร้อน (Thermally fully developed)

2.2.1 ช่วงปรับตัวเต็มที่ทางไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamically fully developed)

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าขณะที่ของไหลนั้นไหลผ่านภายในท่อ ชั้นขอบเขต (boundary layer) จะเริ่มก่อตัวภายในท่อโดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามระยะทาง ที่ความยาวค่าหนึ่งที่ชั้นขอบเขตเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อ ตำแหน่งนี้จะเริ่มเป็นช่วงปรับตัวเต็มที่



รูปที่ 2.1 ชั้นขอบเขตทางไฮโดรไดนามิกส์ช่วงการไหลแบบราบเรียบในท่อทรงกระบอก[2]

รูปร่างของ velocity profile ในช่วงปรับตัวเต็มที่ภายในท่อทรงกระบอก จะเป็นไปตามเงื่อนไขที่ว่าเกรเดียนท์ของความเร็วตามแนวแกนต่างๆ ($\partial u(r, x)/\partial x$) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ในทุกๆตำแหน่ง โดยพิจารณาจากสมการดังนี้

$$\frac{\partial u(r, x)}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ($Re \lesssim 2,300$) สามารถหาความยาวของช่วงการปรับตัวบริเวณทางเข้าได้จากสมการดังนี้

$$\left(\frac{x_{fd,h}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05 Re_D \quad (2.3)$$

$x_{fd,h}$ คือ ความยาวช่วงปรับตัวทางไฮโดรไดนามิกส์จากทางเข้า

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

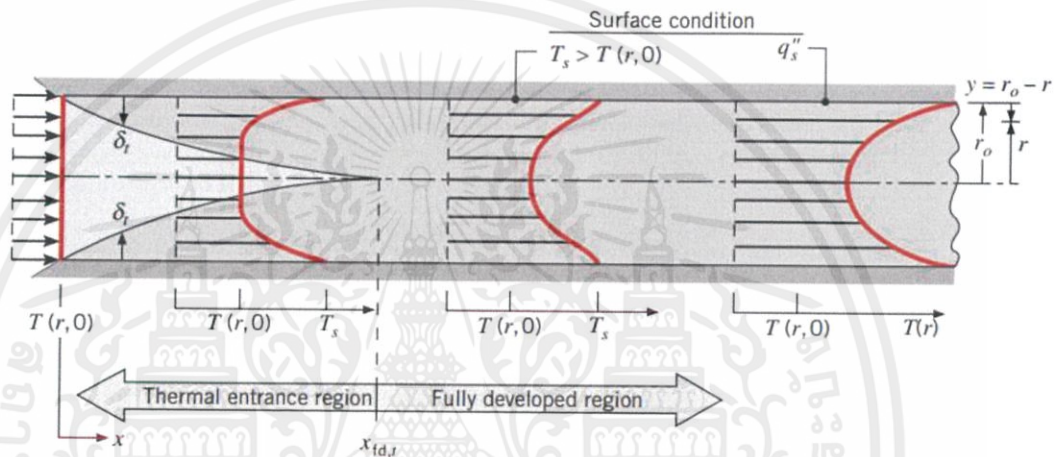
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการไหลแบบปั่นป่วน ($Re \geq 4,000$) หาได้จากการประมาณค่าดังนี้

$$10 \lesssim \left(\frac{x_{fd,h}}{D}\right)_{turb} \lesssim 60 \quad (2.4)$$

2.2.2 ช่วงปรับตัวเต็มที่ทางความร้อน (Thermally fully developed)

ถ้าสถานะที่ผิวท่อถูกกำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวท่อคงที่ ($T_s = \text{คงที่}$) หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อคงที่ ($q'' = \text{คงที่}$) จะทำให้เกิดสถานะปรับตัวเต็มที่ของความร้อน (Thermal fully-developed) เกิดขึ้น รูปร่างของ temperature profile ที่สถานะปรับตัวทางเต็มที่ทางความร้อน $T(r, x)$ จะแตกต่างกันไป ตามเงื่อนไขทั้งอุณหภูมิที่ผิวท่อคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อคงที่



รูปที่ 2.2 ชั้นขอบเขตของทางความร้อนช่วงการไหลแบบราบเรียบในท่อทรงกระบอก[2]

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ สามารถหาค่าความยาวช่วงปรับตัวทางความร้อน จากสมการที่ 2.5

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05 Re_D Pr \quad (2.5)$$

$x_{fd,t}$ คือ ความยาวช่วงปรับตัวทางความร้อนจากทางเข้า

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

Pr คือ เลขพลันด์เทิล

เลขพลันด์เทิลหาได้จากสมการ โดยทุกสมบัติจะหาที่อุณหภูมิเฉลี่ย

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2.6)$$

c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่

μ คือ ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล

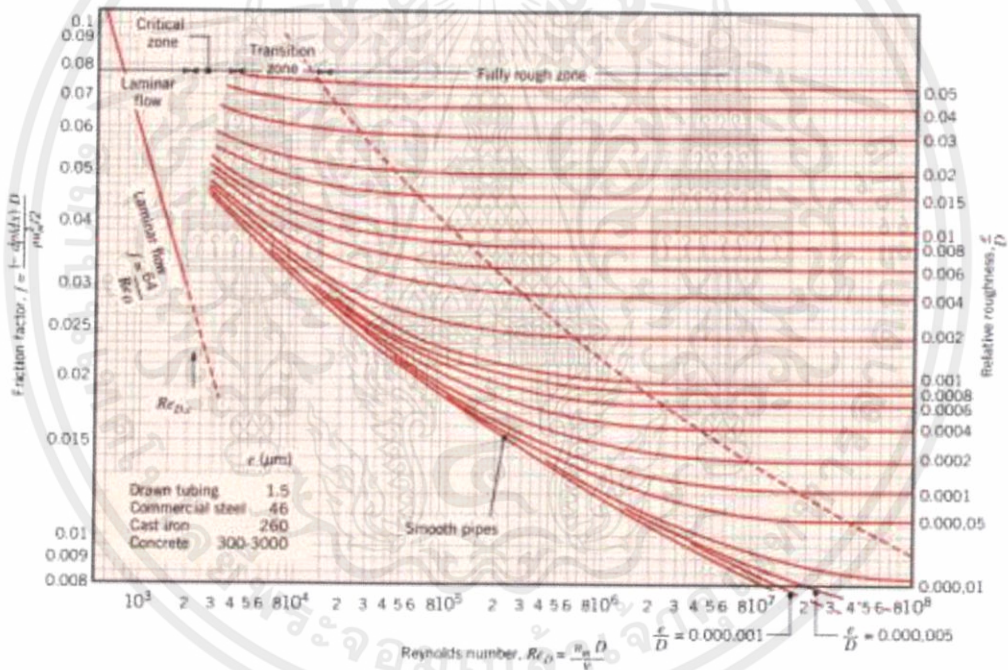
k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน $\left(\frac{x_{f,d,t}}{D}\right)_{turb}$ จะเป็นอิสระจากเลขพลันด์เทิลและจะสามารถประมาณค่าได้เป็น

$$\left(\frac{x_{f,d,t}}{D}\right)_{turb} = 10 \quad (2.7)$$

2.3 ตัวประกอบความเสียหายในการไหลปรับตัวเต็มที่

ในด้านวิศวกรรม บ่อยครั้งจะให้ความสำคัญกับความดันตกในการไหลภายในท่อ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะนำไปใช้เพื่อหาขนาดและกำลังของปั๊มหรือใบพัด ในการหาความดันตกสามารถหาได้จากตัวประกอบความเสียหายของ Moody ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้หน่วยจากรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวประกอบความเสียหายสำหรับการไหลปรับตัวเต็มที่ในท่อทรงกระบอก[2]

นอกจากนี้ยังสามารถค่าตัวประกอบความเสียหาย จากสมการความสัมพันธ์สำหรับท่อผิวเรียบตามสมการ Petukhov

$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad \text{เมื่อ } 3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6 \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันลด (Δp) ที่สภาวะการไหลปรับตัวเต็มทีในช่วงความยาวท่อ (L) จะมีความสัมพันธ์กับตัวประกอบความเสียดทานดังนี้

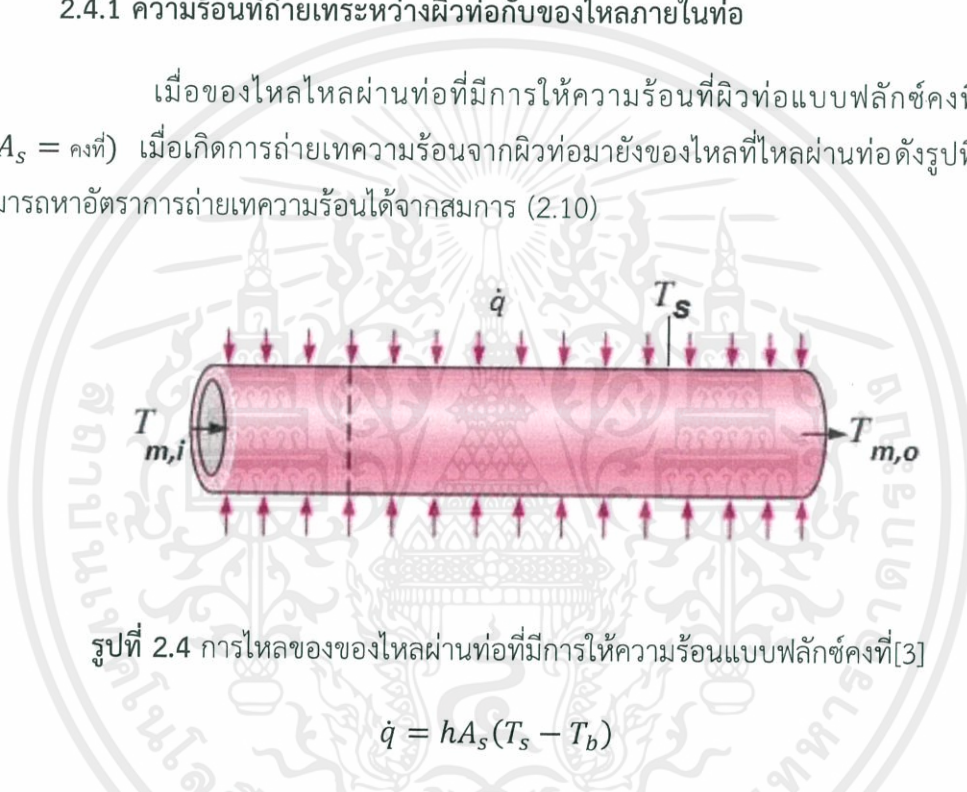
$$f = \Delta p \left(\frac{2}{\rho u_m^2} \right) \left(\frac{D}{L} \right) \quad (2.9)$$

โครงการนี้จะทำการวัดความดันลดภายในท่อเพื่อนำมาคำนวณหาตัวประกอบความเสียดทานที่เกิดขึ้น

2.4 การถ่ายเทความร้อน

2.4.1 ความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างผิวท่อกับของไหลภายในท่อ

เมื่อของไหลไหลผ่านท่อที่มีการให้ความร้อนที่ผิวท่อแบบฟลักซ์คงที่ ($q'' = \dot{q}/A_s = \text{คงที่}$) เมื่อเกิดการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อมายังของไหลที่ไหลผ่านท่อดังรูปที่ 2.4 จะสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากสมการ (2.10)



รูปที่ 2.4 การไหลของของไหลผ่านท่อที่มีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์คงที่[3]

$$\dot{q} = hA_s(T_s - T_b) \quad (2.10)$$

\dot{q} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

T_s คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นที่ผิวของท่อ

A_s คือ พื้นที่ผิวภายในของท่อ

T_b คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ไหลภายในท่อ หาได้จากสมการ

$$T_b = \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \quad (2.11)$$

$T_{m,o}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ทางออกของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T_{m,i}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ทางเข้าของท่อ

2.4.2 ความร้อนที่ของไหลได้รับ

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ทำให้ของไหลในท่อเปลี่ยนอุณหภูมิจากอุณหภูมิต่อเข้าไปเป็นอุณหภูมิออกที่ แสดงดังสมการ (2.12)

$$\dot{q} = \dot{m}c_p(T_{m,o} - T_{m,i}) \quad (2.12)$$

\dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล

c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล

กรณีที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน (heat loss) พลังงานจากการพาความร้อนนั้น เท่ากับพลังงานความร้อนที่อากาศได้รับ

$$hA_s(T_s - T_b) = \dot{m}c_p(T_{m,o} - T_{m,i}) \quad (2.13)$$

$$h = \frac{\dot{m}c_p(T_{m,o} - T_{m,i})}{A_s(T_s - T_b)} \quad (2.14)$$

จากสมการนี้จะสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศภายในท่อได้โดย แทนค่าต่างๆจากการทดลอง

2.5 สหสัมพันธ์การพาความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อช่วงปรับตัวเต็มที่

ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเข้าสู่ช่วงปรับตัวเต็มที่แล้วเลขนัสเซลยังคงมีการเปลี่ยนแปลง ไม่เหมือนการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งมีค่าคงที่ตลอด ดังนั้นเลขนัสเซลจะหาได้จากสมการ สหสัมพันธ์ต่างๆดังนี้

1. สมการของ DittusBoelter

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^n \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$n = 0.4 \text{ ใช้สำหรับการให้ความร้อนกับของไหล } (T_s > T_m)$$

$$n = 0.3 \text{ สำหรับการทำให้เย็นของไหล } (T_s < T_m)$$

ขอบเขตการใช้สมการ

$$\begin{bmatrix} 0.5 < Pr < 120 \\ 6,000 < Re < 10^7 \\ 60 < L/D \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

2. สมการของ Sieder and Tate

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (2.17)$$

ขอบเขตการใช้สมการ

$$\begin{bmatrix} 0.7 < Pr < 10^4 \\ 6,000 < Re < 10^7 \\ 60 < L/D \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

โดยทุกสมบัติจะหาที่ T_m ยกเว้น μ_s ที่หาจากอุณหภูมิที่ผิวท่อ สมการใช้ได้ทั้งฟลักซ์ความร้อนคงที่และอุณหภูมิผิวท่อคงที่ ใช้เมื่ออุณหภูมิของไหลและอุณหภูมิที่ผิวท่อไม่ต่างกันมาก

3. สมการของ Petukhov-Popov

$$Nu = \frac{(f/8)RePr}{K_1 + K_2(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$f = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} \quad (2.20)$$

$$K_1 = 1 + 3.4f \quad (2.21)$$

$$K_2 = 11.7 + \frac{1.8}{Pr^{1/3}} \quad (2.22)$$

ขอบเขตการใช้สมการ

$$\begin{bmatrix} 0.5 < Pr < 2000 \\ 10^4 < Re < 5 \times 10^6 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

4. สมการของ Sleicher-Rouse

$$Nu = 5 + 0.015Re^a Pr_s^b \quad (2.24)$$

เมื่อ

$$a = 0.88 - \frac{0.24}{4 + Pr_s} \quad (2.25)$$

$$b = 1/3 + 0.5e^{-0.6Pr_s} \quad (2.26)$$

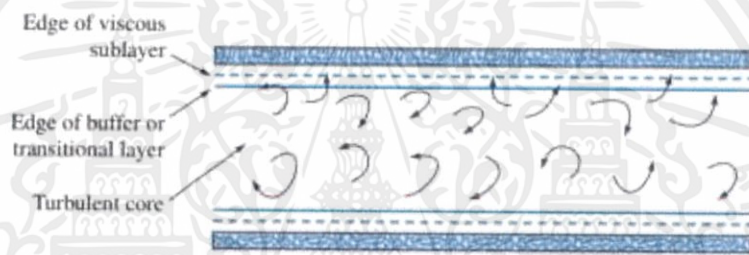
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบเขตการใช้สมการ

$$\begin{cases} 0.1 < Pr < 10^5 \\ 10^4 < Re < 10^6 \end{cases} \quad (2.27)$$

2.6 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนในท่อ

จากรูปที่ 2.5 เป็นลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ จะเห็นว่าเกิดชั้นขอบเขตความต้านทานบางๆที่อยู่ติดกับผนัง (Edge of viscous sublayer) ซึ่งชั้นนี้เป็นชั้นที่ของไหลนิ่งๆไม่มีความปั่นป่วน โดยชั้นบางๆนี้เป็นผลมาจากแรงของความหนืด ส่วนกระแสของไหลบริเวณกลางท่อเป็นกระแสดำปั่นป่วน (Turbulent core) ลูกศรโค้งคือกระแสเอ็ดดี้ ที่สามารถเจาะชั้นบางๆที่เกิดขึ้นได้ ที่ขอบของชั้นจะเกิดการผสมของของไหลในแต่ละขอบเขต จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วระหว่างขอบของชั้นความหนืดกับของไหล



รูปที่ 2.5 โครงสร้างการไหลสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อ[1]

โดยทั่วไปแล้วความหนาของชั้นขอบเขตความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้น ดังนั้นการลดความหนาของชั้นต้านทานทางความร้อนนี้จะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยเพิ่มความปั่นป่วนในกระแสหลัก เพราะกระแสเอ็ดดี้ในกระแสดำปั่นป่วนจะสามารถเจาะชั้นความต้านทานนี้ได้ โดยในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนต่างๆได้มากมาย

2.7 แนวทางในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

วิธีการในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งกลุ่มได้เป็น 2 กลุ่มหลักคือแบบ Active และแบบ Passive

1. แบบ Active เป็นการใช้พลังงานจากภายนอกกระบบเข้ามาช่วย ทำให้เกิดการสั่นของอนุภาคของไหลช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ เช่น การทำให้ของไหลสั่นสะเทือน
2. แบบ Passive เป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยไม่ต้องการใช้พลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วยในระบบ เช่น การทำผิวท่อแบบขรุขระ

วิธีที่นิยมใช้กันส่วนมากคือแบบ Passive เพราะสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องการใช้พลังงานภายนอกมาช่วย ทำให้วิธีแบบ Passive เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการประยุกต์ใช้ในด้านวิศวกรรม การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ Passive ทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนและการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Alok Kumar, Sunil Chamoli และ Manoj Kumar ได้ทำการทดลองเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อทรงกระบอก โดยสอดแผ่นกั้นวงแหวนเจาะรูกลม ทำการทดลองในการไหลของอากาศภายในท่อแบบปั่นป่วน ภายในช่วงเลขเรย์โนลด์ 6,500 ถึง 23,000 ท่อที่ใช้ส่วนการทดลองมีความยาว 1.5 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 68 มิลลิเมตร โดยศึกษาความสัมพันธ์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและความดันครื่องระหว่าง อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นกั้นต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (d/D) เป็น 0.6, 0.7 และ 0.8 และอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของแผ่นกั้นต่อความยาวของท่อในช่วงการทดลอง (L/D) เป็น 1 และดัชนีพื้นที่ของรูกลมของวงแหวนต่อพื้นที่ของวงแหวนทั้งหมด (P_A/T_A) เป็น 8%, 16%, 24% จากการทดลองพบว่า จะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุดเป็น 4 เท่า เมื่อ $P_A/T_A = 8\%$, $d/D = 0.6$ และได้ตัวประกอบสมรรถนะความร้อนเพิ่มมากที่สุดเป็น 1.47 เท่า เมื่อ $P_A/T_A = 24\%$, $d/D = 0.8$

Smith Eiamsa-ard, Chinaruk Thianpong, Petpices Eiamsa-ard และ Pongjet Promvongse ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาน้ำสเซลล์และตัวประกอบความเสียหาย เพื่อที่จะทำการเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อทรงกระบอกที่ติดตั้ง แผ่นบิดเกลียวไว้ภายใน โดยทดลองในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 4,000 ถึง 20,000 พบว่า จะทำให้เกิดการไหลแบบแกว่งตัว ซึ่งสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้และจะเกิดความดันลดในท่อด้วย

V. Kongkai paiboon, K. Nanan และ S. Eiamsa-ard ได้ทำการทดลอง เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนในท่อทรงกระบอกเมื่อใส่แผ่นกั้นทรงกลมซึ่งเจาะรูตรงกลางไว้ภายใน โดยศึกษาตัวแปรต่างๆ เช่น อัตราส่วนของรัศมีแผ่นกั้นต่อรัศมีท่อ (d/D) เป็น 0.5, 0.6 และ 0.7 และอัตราส่วนระยะห่างของแผ่นกั้นต่อรัศมีท่อ (P/D) เป็น 6, 8 และ 12 ทดลองภายในช่วงเลขเรย์โนลด์ 4,000 ถึง 20,000 ผลการทดลองพบว่า ยิ่งค่า P/D และ d/D ยิ่งน้อย จะทำให้ การถ่ายเทความร้อนและความดันลดในท่อเพิ่มขึ้น

N. Piriyaungrod, S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, M. Pimsarn และ K. Nanan ได้ทำการทดลอง เพื่อศึกษาที่ใส่แผ่นบิดเกลียว ซึ่งมีองศาในการขัดเกลียวต่างกัน ทดลองที่เลขเรย์โนลด์ 6,000 ถึง 20,000 ผลการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนและความดันลดภายในท่อจะเพิ่มขึ้น เมื่อมุมและความกว้างของแผ่นบิดเกลียวที่ความยาวเท่ากันลดลง

Sompol Skullong, Pongjet Promvong, Nuthvipa Jayranaiwachira และ Chinaruk Thianpongb ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันลดในท่อที่ใส่แผ่นโลหะตรงตามแนวเดียวกับความยาวท่อ โดยแผ่นโลหะจะถูกเจาะเป็นช่องสามเหลี่ยม และมีแผ่นโลหะสามเหลี่ยมยื่นออกมาทำมุมต่างๆกับทิศทางการไหลของอากาศ ซึ่งแผ่นโลหะนี้เรียกว่า Delta-wing โดยทดลองในช่วงเลขเรย์โนลด์ 4,200 ถึง 25,000 จากผลการทดลอง ยิ่ง Delta-wing ทำมุมกับทิศทางการไหลของอากาศมากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านและความดันลดภายในท่อเพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และรูปแบบการทดลอง
- 2.สืบค้นงานวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อทรงกระบอก
- 3.ออกแบบและสร้างการทดลอง
- 4.ทำการทดลอง และเก็บผลการทดลองภายในช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่กำหนดไว้
- 5.วิเคราะห์และสรุปผล

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

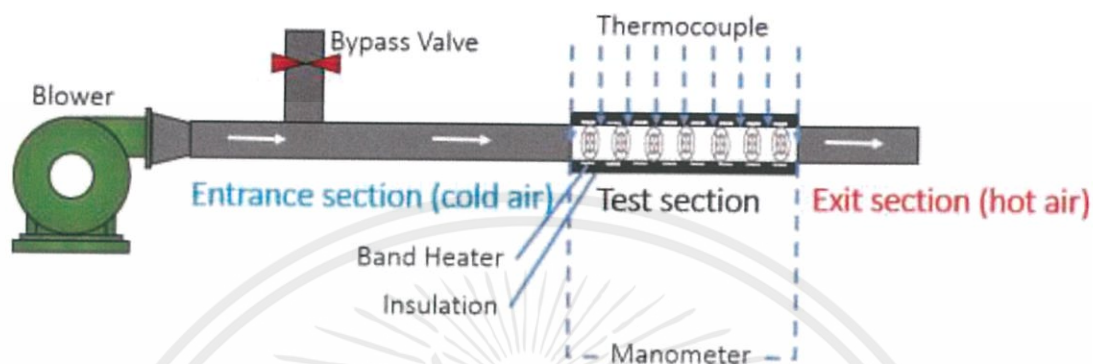
- 1.เครื่องเป่าอากาศ
- 2.ท่อทองแดง
- 3.เครื่องวัดความเร็วลม
- 4.วงจรหรีไฟ
- 5.เทอร์โมคัปเปิล
- 6.เครื่องทำความร้อนแบบปรัดท่อ
- 7.วาล์ว
- 8.มานอมิเตอร์แบบตัวยู

3.3 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

1. การออกแบบท่อของชุดทดลอง

จากรูปที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบต่างๆของชุดทดลอง ในการทดลองจะแบ่งส่วนเป็นสามส่วน ส่วนแรกคือ ส่วนของระยะปรับตัว (Entrance section) เพื่อให้อากาศที่ถูกเป่าเข้ามาได้ปรับตัวจนกระทั่งปรับตัวเต็มที่ ส่วนที่สองคือ ส่วนทดลอง (Test section) เมื่อของไหลเข้าสู่ช่วง

ปรับตัวเต็มที่แล้ว ของไหลจะเข้าสู่ส่วนการทดลอง ซึ่งภายในส่วนนี้เป็นส่วนที่มีการติดตั้งแผ่นกันภายในท่อ ส่วนที่สุดท้ายคือ ส่วนทางออก (Exit section) มีเพื่อใช้ป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกไหลเข้ามาในชุดทดลอง เพราะจะก่อความเสี่ยงการวัดอุณหภูมิของอากาศขาออก



รูปที่ 3.1 แผนภาพการสร้างชุดทดลอง

1.1 การคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่วนทดลอง

คำนวณโดยอ้างอิงจากอัตราไหลเชิงปริมาตรสูงสุดที่เครื่องเป่าอากาศสามารถทำได้ จากนั้นเลือกเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่จะใช้เพื่อให้สัมพันธ์กับช่วงเลขเรย์โนลด์ที่ใช้ทดลอง โดยอิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจากงานวิจัยอื่นเป็นหลัก โดยขนาดท่อไม่ควรเล็กเกินไปที่จะสามารถใส่แผ่นกันได้

1.2 การคำนวณความยาวท่อช่วงต่างๆของชุดทดลอง

- ส่วนของระยะปรับตัว สามารถหาได้จากสมการระยะปรับตัวทางไฮโดรไดนามิกส์ที่ทางเข้าของชุดทดลองเมื่อมีการไหลแบบปั่นป่วนได้จากสมการ (2.4) และอ้างอิงจากงานวิจัยอื่น
- ส่วนของการทดลอง สามารถหาได้จากสมการ (2.7) และอ้างอิงจากงานวิจัยอื่น
- ส่วนของทางออก อ้างอิงจากงานวิจัยอื่น

1.3 การเลือกวัสดุท่อในส่วนของการทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้ท่อที่ทำจากทองแดงที่มีความหนาไม่มากและไม่บางมากจนเกินไป เนื่องจากต้องวัดอุณหภูมิที่ผิวท่อภายใน ซึ่งการใช้วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

สูง เช่น ทองแดง ทำให้ความร้อนกระจายบนผิวท่อได้ดี เมื่อวัดอุณหภูมิผิวท่อภายใน จะสามารถวัดที่ผิวท่อด้านนอกได้ เนื่องจากมีการกระจายตัวของความร้อนทั่วถึง

2. การคำนวณขนาดของฮีตเตอร์แบบรัดท่อ

คำนวณโดยอิงจากการที่ทราบว่าเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิสามารถวัดอุณหภูมิได้ละเอียดสุดที่ทศนิยม 1 ตำแหน่ง ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการวัด จึงกำหนดให้ผลต่างของอุณหภูมิอากาศเข้าและออกมีค่าประมาณ 10 องศาเซลเซียส จากนั้นคำนวณหาค่ากำลังของฮีตเตอร์จากสมการ (2.12) โดยประมาณว่ามีการสูญเสียความร้อนประมาณ 20%

3. การออกแบบแผ่นกัน

การออกแบบแผ่นกัน มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนให้กับกระแสอากาศ โดยที่เกิดความดันตกน้อยที่สุด จากรูปที่ 3.2 เป็นแผ่นกันที่ออกแบบมาเพื่อเพิ่มความปั่นป่วนให้กระแสอากาศ เพื่อให้เกิดความปั่นป่วนกับอากาศบริเวณผิวท่อ และให้เกิดการผสมของอากาศบริเวณกระแสอากาศที่กลางท่ออีกด้วย รูปที่ 3.2 คือแผ่นกันมีอัตราส่วนช่องเปิดเป็น 49% และ 36% คือแผ่นที่อยู่ทางด้านซ้ายและขวาตามลำดับ



รูปที่ 3.2 แผ่นกัน

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

1. เปิดเครื่องเป่าอากาศให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง ปรับอัตราการไหลของอากาศโดยวาล์วบายพาส วัดความเร็วของอากาศโดยใช้เครื่องวัดอัตราเร็วอากาศ
2. เปิดสะพานจ่ายไฟให้กับเครื่องทำความร้อนแบบรัดท่อเพื่อให้ความร้อนกับผิวท่อแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่
3. วัดอุณหภูมิที่ผิวท่อทั้ง 7 ตำแหน่งและวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของส่วนทดลอง

4. ปรับวาล์วบายพาสเพื่อปรับความเร็วของอากาศแล้วดำเนินการซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 โดย เปลี่ยนเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 จนถึง 25,000
5. ติดตั้งแผ่นกั้นในส่วนทดลองแล้วดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 4
6. เปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นตามที่แล้วดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 5
7. วิเคราะห์ข้อมูลค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปเลขนัสเซล

3.4.2 การหาค่าตัวประกอบความเสียหาย

1. เปิดเครื่องเป่าอากาศให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง ปรับอัตราการไหลของอากาศโดยวาล์วบายพาส วัดความเร็วของอากาศโดยใช้เครื่องวัดอัตราเร็วอากาศ
2. วัดค่าความดันตกคร่อมภายในท่อโดยใช้ทุบ์มานอมิเตอร์
3. ปรับวาล์วบายพาสเพื่อปรับความเร็วของอากาศแล้วดำเนินการซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 โดย เปลี่ยนเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 จนถึง 25,000
4. ติดตั้งแผ่นกั้นในส่วนทดลองแล้วดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 4
5. เปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นตามที่แล้วดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 5
6. วิเคราะห์ข้อมูลค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปเลขนัสเซล

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

เมื่อทราบอัตราเร็วเชิงมวลอากาศ อุณหภูมิของอากาศขาเข้าและออก พื้นที่ผิวท่อ ภายใน อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวท่อ อุณหภูมิเฉลี่ยอากาศภายในท่อ จะหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้จากสมการ (3.1)

$$h = \frac{m c_p (T_{m,o} - T_{m,i})}{A_s (T_s - T_b)} \quad (3.1)$$

2. การหาเลขนัสเซล

หาได้สมการด้านล่าง เมื่อทราบสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยภายในท่อ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ สามารถหาเลขนัสเซลได้จากสมการ (3.2)

$$Nu \equiv \frac{hD}{k} \quad (3.2)$$

3. การหาตัวประกอบความเสียดทาน

เมื่อทราบความดันลดภายในท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่อ อัตราเร็วเฉลี่ยและความหนาแน่นของอากาศ สามารถหาตัวประกอบความเสียดทานได้จากสมการ (3.3)

$$f = \Delta p \left(\frac{2}{\rho u_m^2} \right) \left(\frac{D}{L} \right) \quad (3.3)$$

4. การหาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

หาได้จากสมการ (3.4)

$$\eta = (Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3} \quad (3.4)$$



บทที่ 4

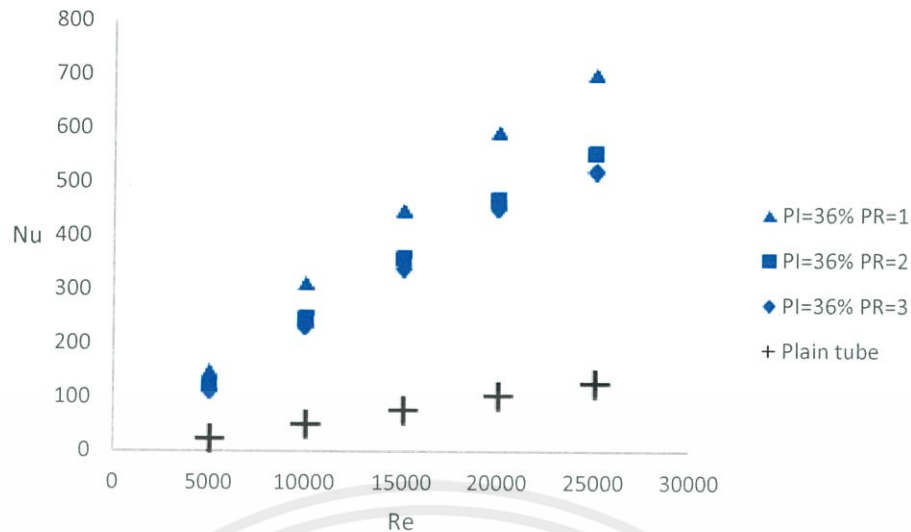
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ

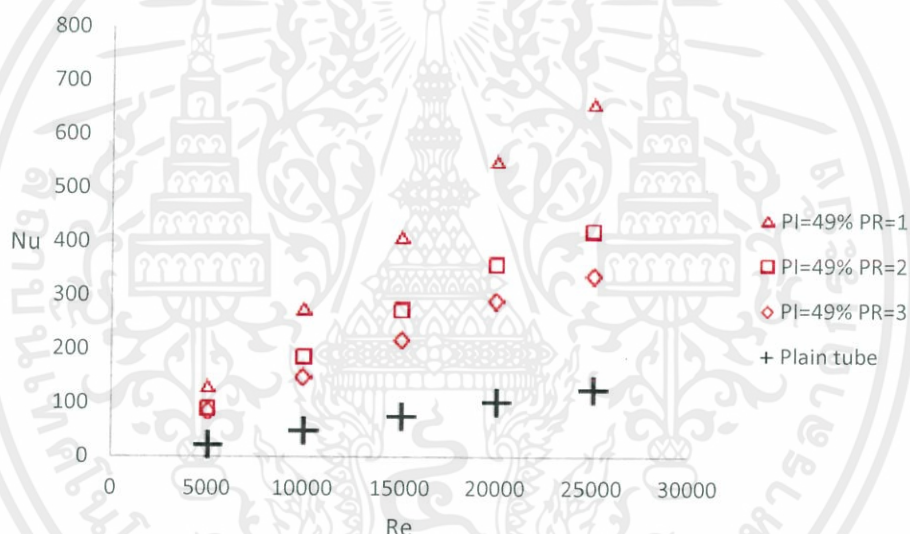
ในส่วนของการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน จะแสดงผลการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนในรูปของกราฟระหว่างเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์

4.1.1 ผลของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อการถ่ายเทความร้อน

เพื่อทราบผลของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใส่แผ่นกั้นที่ระยะห่างต่างกัน ต่างๆภายในท่อ จึงเก็บข้อมูลเพื่อคำนวณเลขนัสเซลจากการทดลองเมื่อใช้แผ่นกั้นระยะห่าง PR เป็น 1 2 และ 3 โดย PR คืออัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ นำเลขนัสเซลมาพลอตกับเลขเรย์โนลด์เพื่อดูความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มสูงขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อมายังอากาศเพิ่มขึ้นส่งผลให้เลขนัสเซลเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อใส่แผ่นกั้นเข้าไปภายในท่อ ทำให้ความปั่นป่วนของอากาศภายในท่อเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าที่เลขเรย์โนลด์เดียวกัน ทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศภายในท่อเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าที่ไม่มีการใส่แผ่นกั้น เมื่อเปรียบเทียบผลของเลขนัสเซลในท่อที่ใส่แผ่นกั้นที่มีอัตราส่วนช่องเปิดเท่ากัน แต่มีระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นแตกต่างกัน พบว่าการลดระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นลงเลขนัสเซลจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการลดระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นเท่ากับการเพิ่มจำนวนแผ่นกั้น ส่งผลให้มีการขวางทิศทางการไหลมากขึ้น ความปั่นป่วนของกระแสอากาศภายในท่อจึงเพิ่มสูงขึ้น เป็นสาเหตุให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น จะสังเกตได้ว่า เมื่อระยะห่าง PR เป็น 1 จะทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นได้มากกว่า PR เป็น 2 และ 3 อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเมื่อระยะห่าง PR เป็น 1 เป็นระยะที่อยู่ในช่วงที่เกิดกระแสไหลวนบริเวณหลังแผ่นกั้น ทำให้กระแสไหลวนจากแผ่นกั้นหนึ่งไปปะทะกับอีกแผ่นกั้นหนึ่ง ทำให้เกิดกระแสไหลวนเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะสังเกตได้ว่าแผ่นกั้นอัตราส่วนช่องเปิด 49% เมื่อลดระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น จะทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นได้มากกว่าแผ่นกั้นอัตราส่วนช่องเปิด 36% เนื่องจากแผ่นกั้นอัตราส่วนช่องเปิด 36% จะเกิดการไหลแบบเจ็ทที่รุนแรงกว่า ซึ่งมีความปั่นป่วนสูงอยู่แล้ว เมื่อลดระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น ทำให้ไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างมากเท่าแผ่นกั้นอัตราส่วนช่องเปิด 49%



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบนัสเซลที่ระยะห่างของแผ่นกันต่างกัน อัตราส่วนช่องเปิด 36%

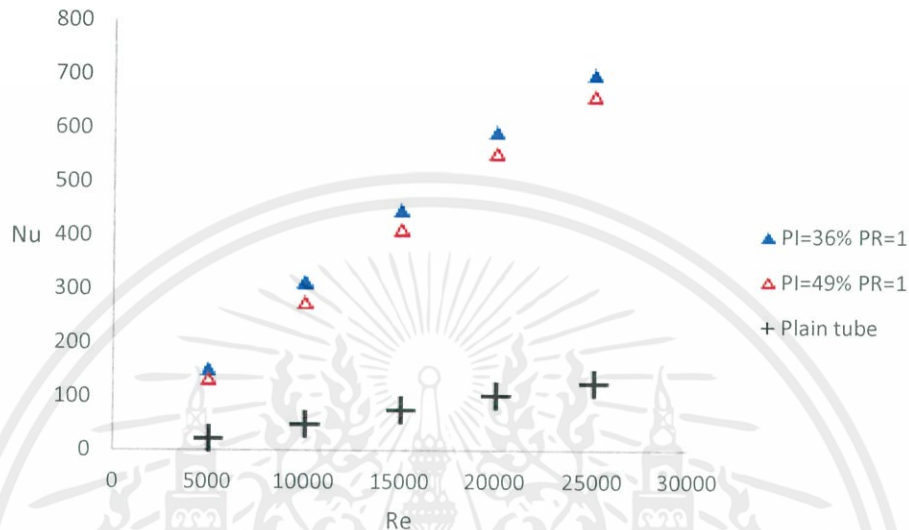


รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบนัสเซลที่ระยะห่างของแผ่นกันต่างกัน อัตราส่วนช่องเปิด 49%

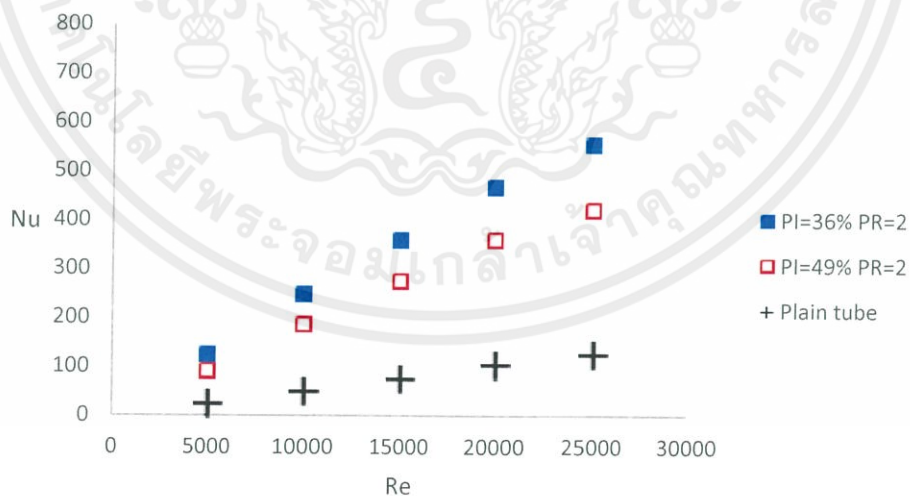
4.1.2 ผลของอัตราส่วนช่องเปิดแผ่นกันต่อการถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 4.3 4.4 และ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แผ่นกันโดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นกันเท่ากัน แต่มีอัตราส่วนช่องเปิดต่างกัน พบว่าเลขนัสเซลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดของแผ่นกันมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อช่องไหลวิ่งผ่านช่องเปิดแคบ อิทธิพลของการไหลแบบเจ็ทที่เกิดขึ้นจะมากกว่าการไหลแบบเจ็ทที่ผ่านแผ่นกันที่อัตราส่วนช่องเปิดมากกว่า ดังนั้นการใช้แผ่นกันที่อัตราส่วนช่องเปิดน้อยจะมีการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าแผ่นกันที่อัตราส่วนช่องเปิดมาก เมื่อเปรียบเทียบ-

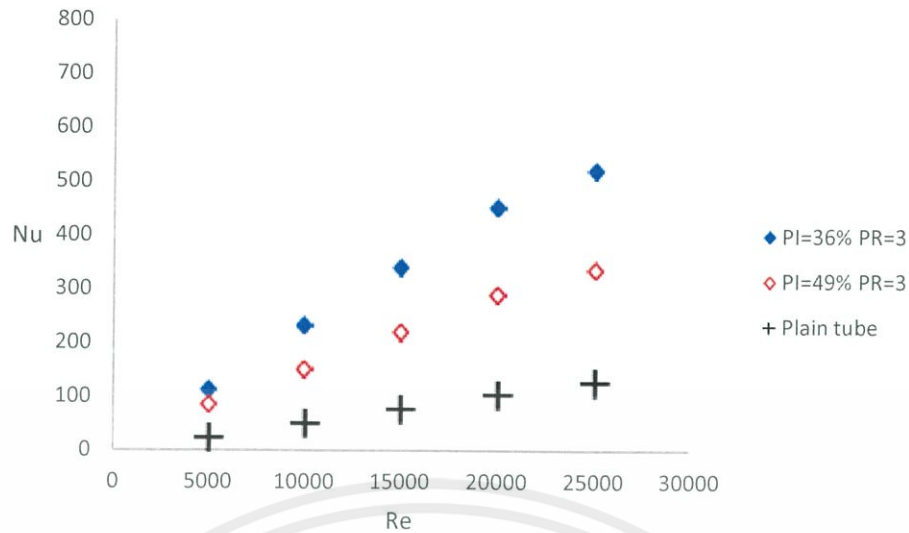
รูปที่ 4.3 4.4 และ 4.5 จะสังเกตได้ว่า การถ่ายเทความร้อนของแผ่นกั้นอัตราส่วนช่องเปิด 36% จะสูงกว่าแผ่นกั้นอัตราส่วนช่องเปิด 49% ทุกรูป แต่เมื่อ PR ลดลง ผลต่างของการถ่ายเทความร้อนของแผ่นกั้นอัตราส่วนช่องเปิด 36% และอัตราส่วนช่องเปิด 49% จะเริ่มลดน้อยลง เพราะระยะแผ่นกั้นที่ใกล้กันมากขึ้นทำให้การเกิดกระแสไหลวนทั้งแผ่นกั้นอัตราส่วนช่องเปิด 36% และอัตราส่วนช่องเปิด 49% เกิดในลักษณะใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบเลขนัสเซลที่อัตราส่วนช่องเปิด 36% และ 49% อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 1



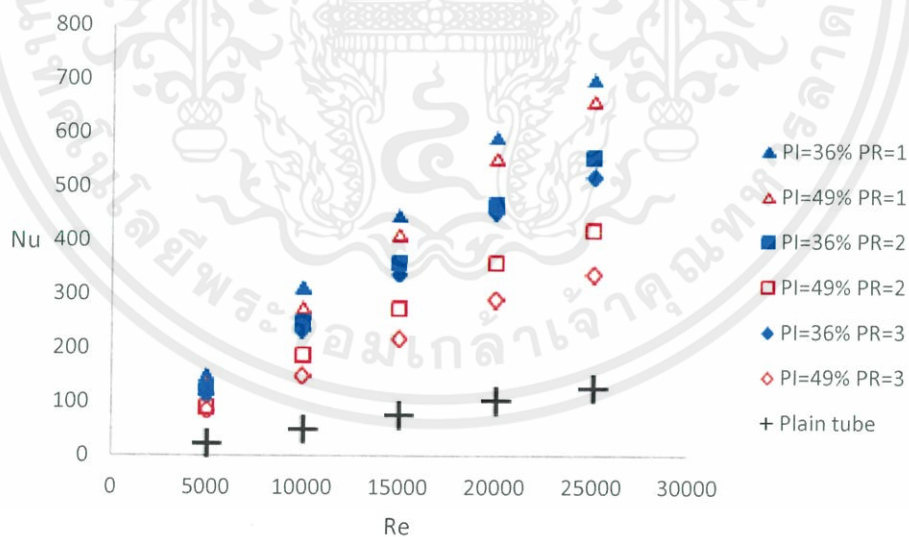
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบเลขนัสเซลที่อัตราส่วนช่องเปิด 36% และ 49% อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 2



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบเลขนัสเซลที่อัตราส่วนช่องเปิด 36% และ 49% อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 3

4.1.3 ภาพรวมการถ่ายเทความร้อน

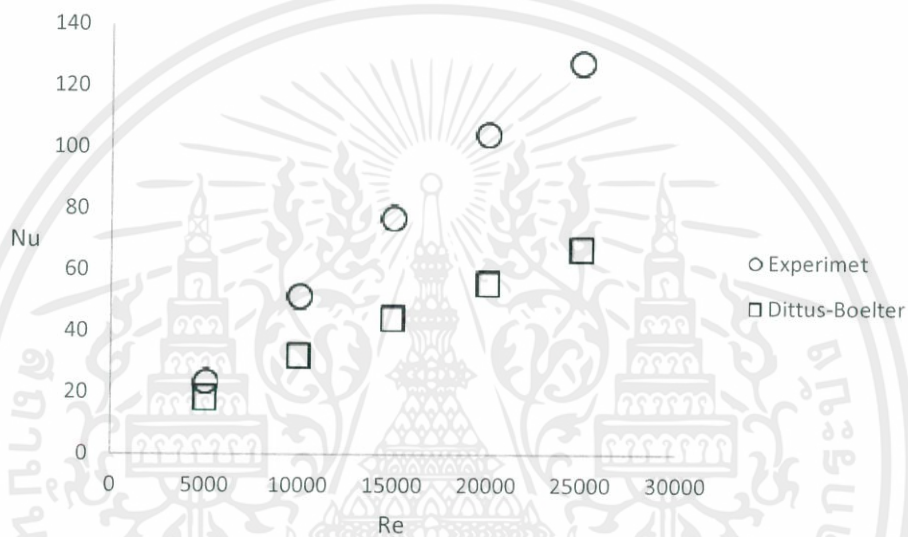
จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อใส่แผ่นกันที่มีระยะห่างของแผ่นกันที่น้อยที่สุดในการทดลอง (PR=1) และอัตราส่วนช่องเปิดที่น้อยที่สุดในการทดลอง (PI=36%) จะทำให้เลขนัสเซลหรือการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับท่อเปล่าที่ไม่มีการใส่แผ่นกัน



รูปที่ 4.6 กราฟภาพรวมเลขนัสเซล

4.1.4 การเทียบผลการทดลองกับสมการสหสัมพันธ์การพาความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนช่วงปรับตัวเต็มที่

จากรูป 4.7 เปรียบเทียบเลขนัสเซิลจากการทดลองกับเลขนัสเซิลจากสมการสหสัมพันธ์การพาความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อช่วงปรับตัวเต็มที่ สมการ (2.17) พบว่าเลขนัสเซิลที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าเลขนัสเซิลที่คำนวณจากสมการสหสัมพันธ์การพาความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนช่วงปรับตัวเต็มที่ สาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากชุดทดลองใช้การผ่านลมจากเครื่องเป่าอากาศโดยตรง ซึ่งลมจากเครื่องเป่าอากาศมีความไม่เป็นระเบียบสูง ส่งผลให้ความปั่นป่วนของอากาศเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบเลขนัสเซิลจากการทดลองกับสมการ

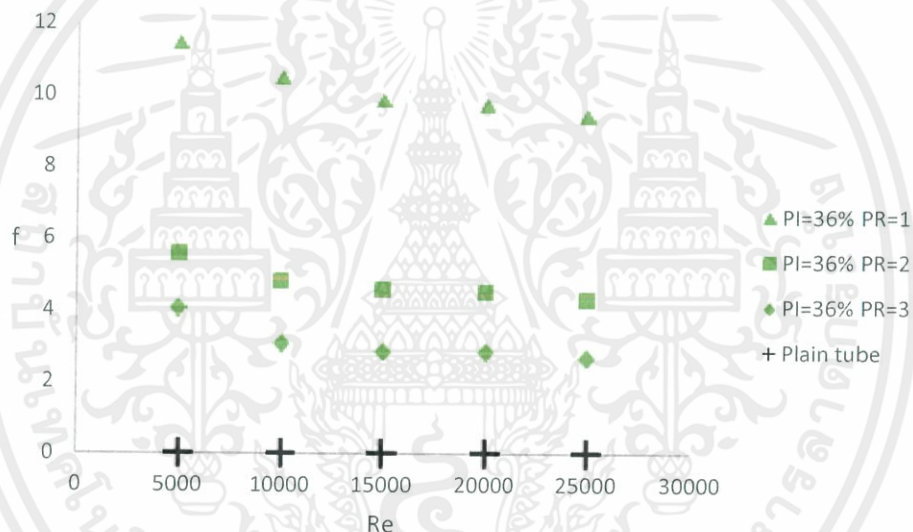
4.2 ผลการทดลองด้านการสูญเสียความดันภายในท่อ

ในส่วนของผลการทดลองด้านการสูญเสียความดันภายในท่อ จะแสดงผลในรูปแบบของกราฟระหว่างของตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลด์

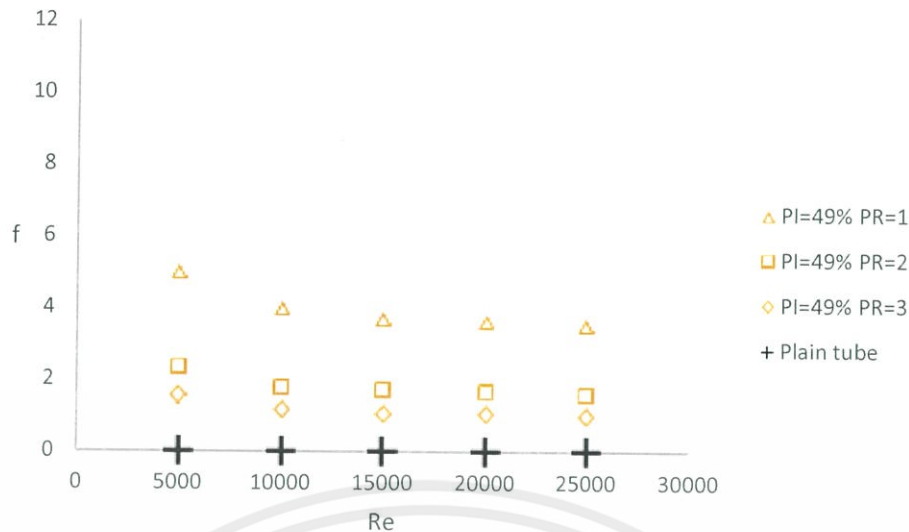
4.2.1 ผลของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อตัวประกอบความเสียดทาน

จากค่าความดันลดที่ได้จากการทดลอง เมื่อใส่แผ่นกั้นรูปทรงต่างๆภายในท่อ นำมาคำนวณตัวประกอบความเสียดทานแล้ว นำมาพลอตกับเลขเรย์โนลด์เพื่อดูความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นตัวประกอบความเสียดทานจะลดลง เกิดจากเมื่อเลขเรย์โนลด์

สูงขึ้น ทำให้อัตราส่วนของความดันลดและอัตราเร็วของอากาศภายในท่อลดลง ส่งผลให้ตัวประกอบความเสียดทานลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบผลของตัวประกอบความเสียดทานในท่อที่ใส่แผ่นกั้นที่มีอัตราส่วนช่องเปิดเท่ากัน แต่มีระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นแตกต่างกัน พบว่าการลดระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นลงตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการลดระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นเท่ากับการเพิ่มจำนวนแผ่นกั้น ทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนมากขึ้น และกระแสปั่นป่วนนี้ก่อนให้เกิดความดันลดภายในท่อ เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าเมื่อลดระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นลง จะทำให้ความดันลดเมื่อแผ่นกั้นอัตราส่วนช่องเปิด 36% อัตราส่วนช่องเปิด 49% เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีแผ่นกั้นอัตราส่วนช่องเปิด 36% จะทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้นมากกว่าแผ่นกั้นอัตราส่วนช่องเปิด 49% เพราะว่าอัตราส่วนช่องเปิด 36% จะทำให้เกิดการไหลแบบเจ็ทที่รุนแรงกว่าอัตราส่วนช่องเปิด 49% ส่งผลให้ความดันลดเพิ่มสูงกว่า



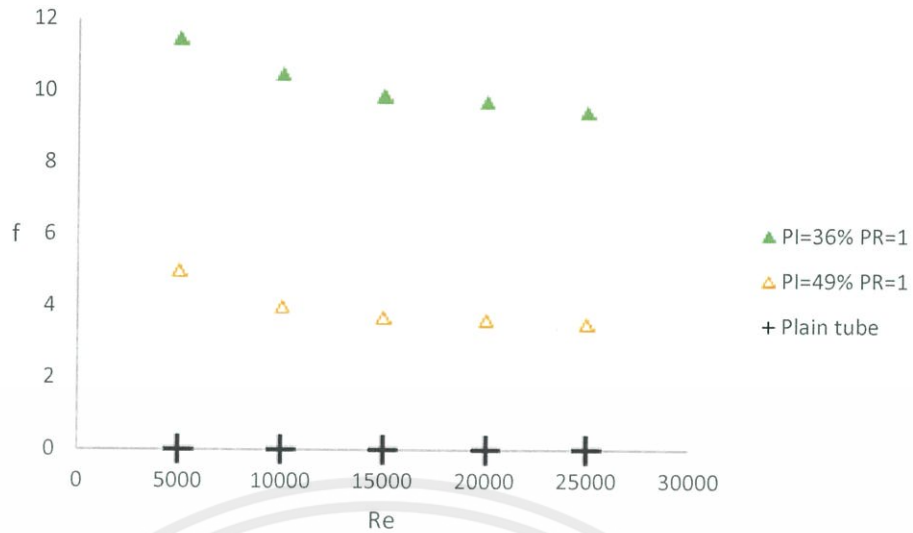
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานที่ระยะห่างของแผ่นกั้นต่างกัน อัตราส่วนช่องเปิด 36%



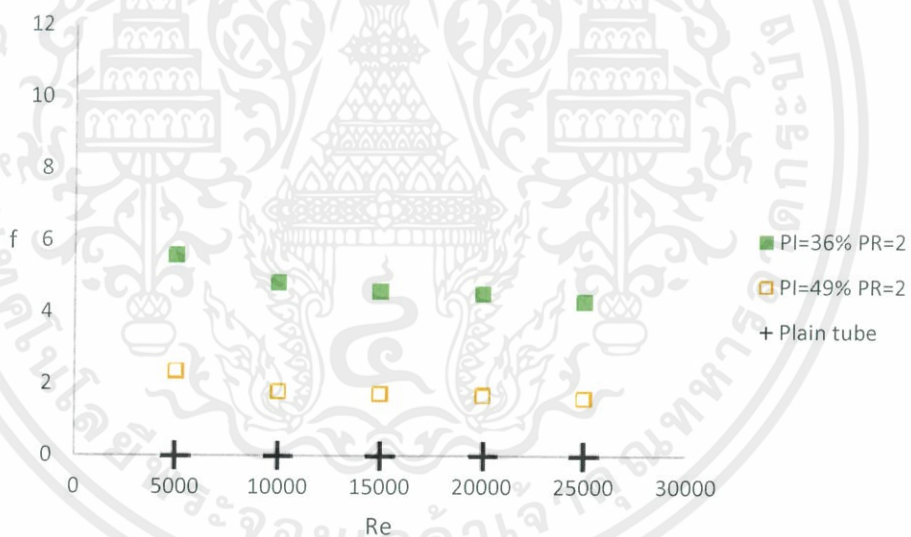
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานที่ระยะห่างของแผ่นกันต่างกัน อัตราส่วนช่องเปิด 49%

4.2.2 ผลของอัตราส่วนช่องเปิดแผ่นกันต่อตัวประกอบความเสียดทาน

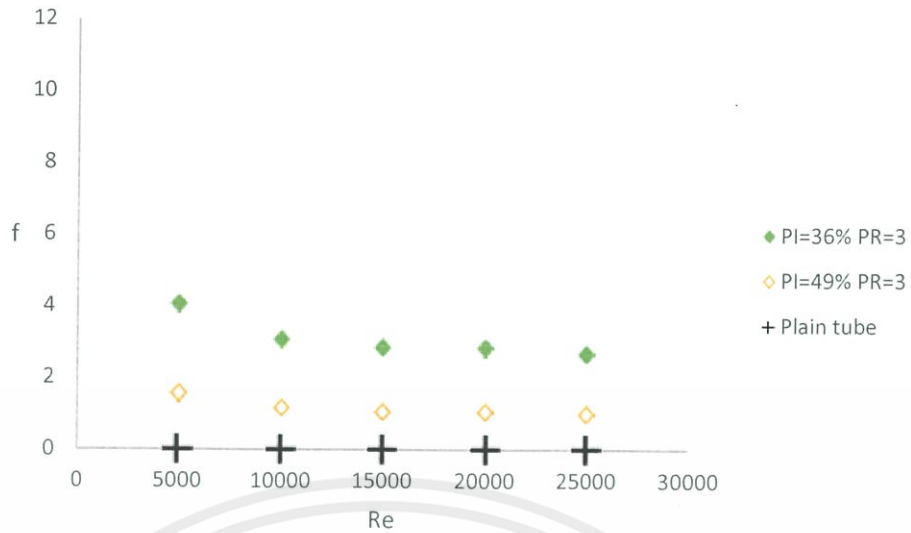
จากรูปที่ 4.10 4.11 และ 4.12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แผ่นกันโดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นกันเท่ากัน แต่มีอัตราส่วนช่องเปิดต่างกัน พบว่าเมื่ออัตราส่วนช่องเปิดของแผ่นกันมีค่าลดลง ส่งผลให้ตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อของไหลวิ่งผ่านช่องเปิดแคบ จะทำให้เกิดการไหลลักษณะเจ็ทซึ่งจะเกิดกระแสน้ำวนขึ้นพร้อมกัน เป็นสาเหตุให้เกิดความดันลดเพิ่มขึ้น ตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้น เมื่อมีการไหลแบบเจ็ทผ่านแผ่นกันที่มีอัตราส่วนช่องเปิดน้อย อิทธิพลของการไหลแบบเจ็ทที่เกิดขึ้นจะมากกว่าการไหลแบบเจ็ทที่ผ่านแผ่นกันที่อัตราส่วนช่องเปิดมากกว่า ดังนั้นการใช้แผ่นกันที่อัตราส่วนช่องเปิดน้อยจะมีตัวประกอบความเสียดทานที่สูงกว่าแผ่นกันที่อัตราส่วนช่องเปิดมาก เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.10 4.11 และ 4.12 พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นกันน้อยลง ผลต่างของความดันลดระหว่างแผ่นกันอัตราส่วนช่องเปิด 36% และแผ่นกันอัตราส่วนช่องเปิด 49% จะมากขึ้น เพราะแผ่นกันอัตราส่วนช่องเปิด 36% จะทำให้เกิดการไหลแบบเจ็ทที่รุนแรงกว่า



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานที่อัตราส่วนช่องเปิด 36% และ 49% อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 1



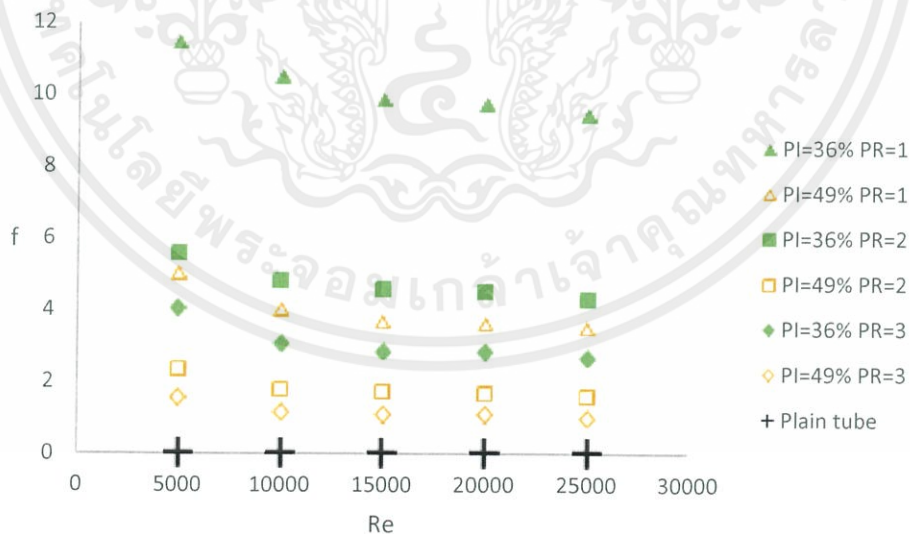
รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานที่อัตราส่วนช่องเปิด 36% และ 49% อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 2



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานที่อัตราส่วนช่องเปิด 36% และ 49% อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 3

4.2.3 ภาพรวมการตัวประกอบความเสียดทาน

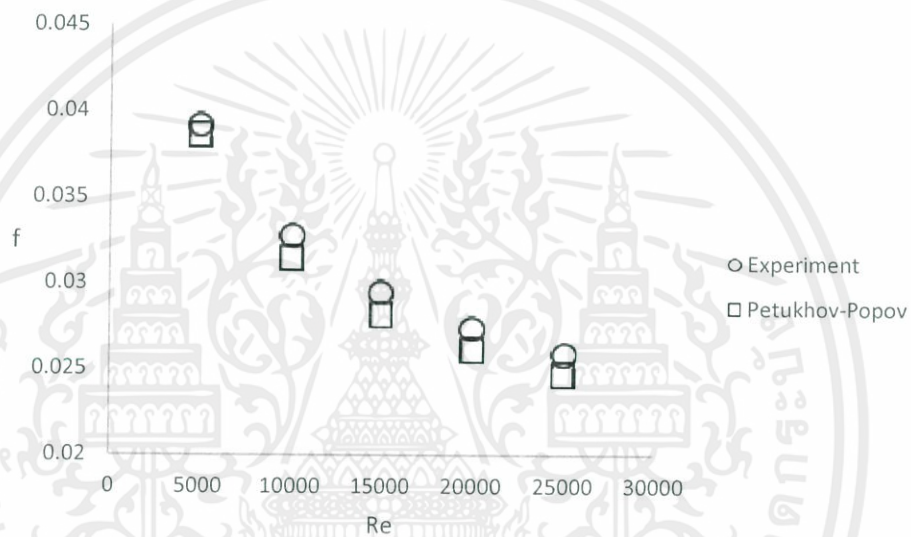
จากรูปที่ 4.13 การใส่แผ่นกั้นนั้นจะทำให้ตัวประกอบความเสียดทานนั้นเพิ่มสูงขึ้น ในการทดลองนี้ การใส่แผ่นกั้นที่ระยะห่างน้อยที่สุด (PR=1) และอัตราส่วนช่องเปิดที่น้อยที่สุด (PI=36%) จะทำให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นสูงที่สุด



รูปที่ 4.13 ภาพรวมตัวประกอบความเสียดทาน

4.2.4 การเทียบผลการทดลองกับสมการความสัมพันธ์ของตัวประกอบความเสียดทาน

จากรูป 4.14 เป็นกราฟผลการทดลองระหว่างตัวประกอบความเสียดทานในการไหลปรับตัวเต็มทีและเลขเรย์โนลด์ ซึ่งเป็นตัวประกอบความเสียดทานในการไหลปรับตัวเต็มทีจากท่อเปล่า โดยเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานในการไหลปรับตัวเต็มทีที่เก็บจากชุดทดลองกับข้อมูลจากความสัมพันธ์ตัวประกอบความเสียดทานในการไหลปรับตัวเต็มที (สมการที่ 2.8) Petukhov-Popov พบว่า ค่าตัวประกอบความเสียดทานจากการทดลองมีแนวโน้มและค่าของตัวประกอบความเสียดทานใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานจากการทดลองกับสมการ

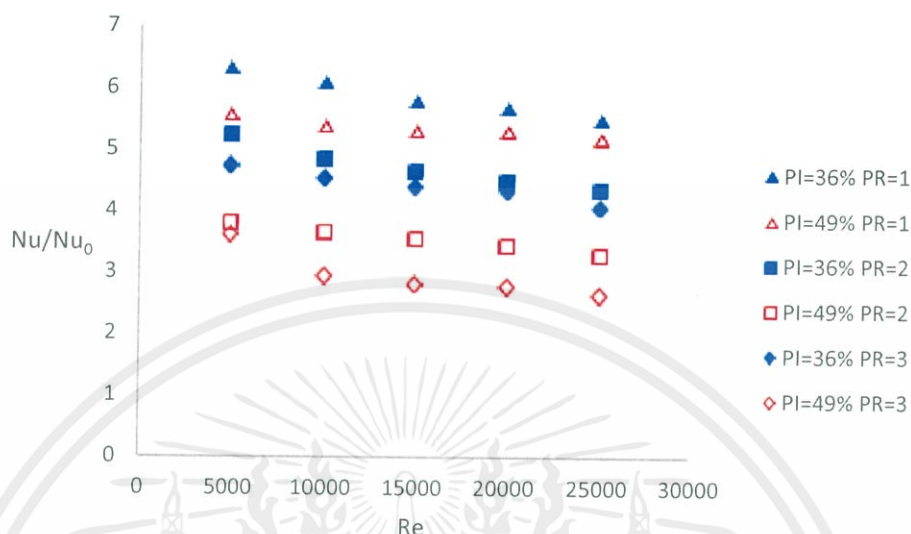
4.3 ผลการทดลองด้านสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ

ในส่วนของผลการทดลองด้านสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ จะแสดงผลในรูปแบบของกราฟระหว่างสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและเลขเรย์โนลด์

4.3.1 อัตราส่วนเลขนัสเซลของท่อที่ใส่แผ่นกั้นต่อเลขนัสเซลของท่อเปล่า

จากรูป 4.15 แสดงแผนภูมิระหว่างอัตราส่วนของเลขนัสเซลภายในท่อที่ใส่แผ่นกั้นในลักษณะแตกต่างกันต่อเลขนัสเซลของท่อเปล่า (Nu/Nu_0) และเลขเรย์โนลด์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนของเลขนัสเซลภายในท่อที่ใส่แผ่นกั้นต่อเลขนัสเซลของท่อเปล่าลดลง ซึ่งหมายความว่า ที่เลขเรย์โนลด์สูง การใส่แผ่นกั้นภายในท่อนั้นช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

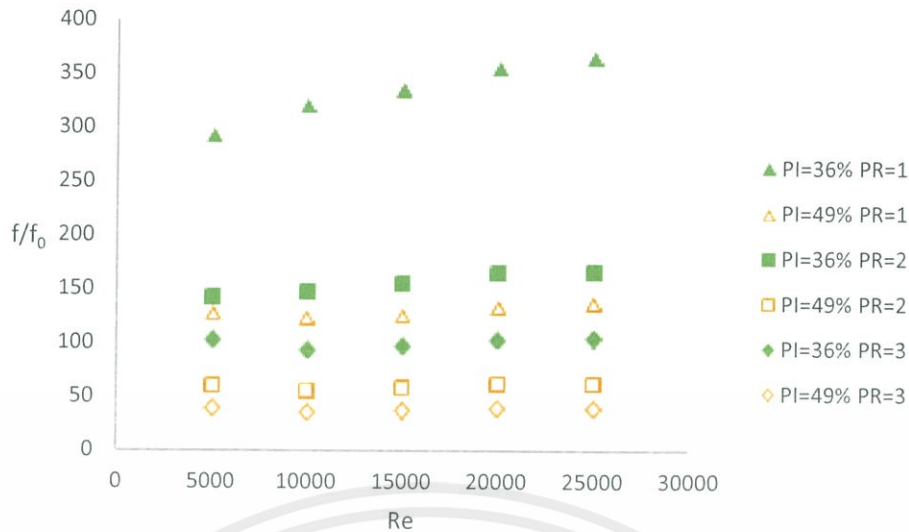
ร้อนได้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับท่อเปล่าที่เรย์โนลด์เดียวกัน ในการทดลองนี้ เมื่อใส่แผ่นกั้นที่ระยะห่างน้อยที่สุด (PR=1) และอัตราส่วนช่องเปิดที่น้อยที่สุด (PI=36%) จะทำให้อัตราส่วนของเลขนัสเซิลภายในท่อที่ใส่แผ่นกั้นในลักษณะแตกต่างกันต่อเลขนัสเซิลของท่อเปล่ามีค่ามากที่สุด



รูปที่ 4.15 อัตราส่วนเลขนัสเซิลต่อเลขนัสเซิลในท่อเปล่า

4.3.2 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานของท่อที่ใส่แผ่นกั้นต่อตัวประกอบความเสียดทานของท่อเปล่า

จากรูป 4.16 พบว่า เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มสูงขึ้น อัตราส่วนของตัวประกอบความเสียดทานในท่อที่ใส่แผ่นกั้นในลักษณะแตกต่างกันต่อตัวประกอบความเสียดทานในท่อเปล่า (f/f_0) จะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่า ที่เลขเรย์โนลด์สูง การใส่แผ่นกั้นภายในท่อนั้น ตัวประกอบความเสียดทานภายในท่อที่ใส่แผ่นกั้นจะเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับท่อเปล่า ในการทดลองนี้ เมื่อใส่แผ่นกั้นที่ระยะห่างน้อยที่สุด (PR=1) และอัตราส่วนช่องเปิดที่น้อยที่สุด (PI=36%) จะทำให้อัตราส่วนของตัวประกอบความเสียดทานในท่อที่ใส่แผ่นกั้นในลักษณะแตกต่างกันต่อตัวประกอบความเสียดทานในท่อเปล่ามีค่ามากที่สุด



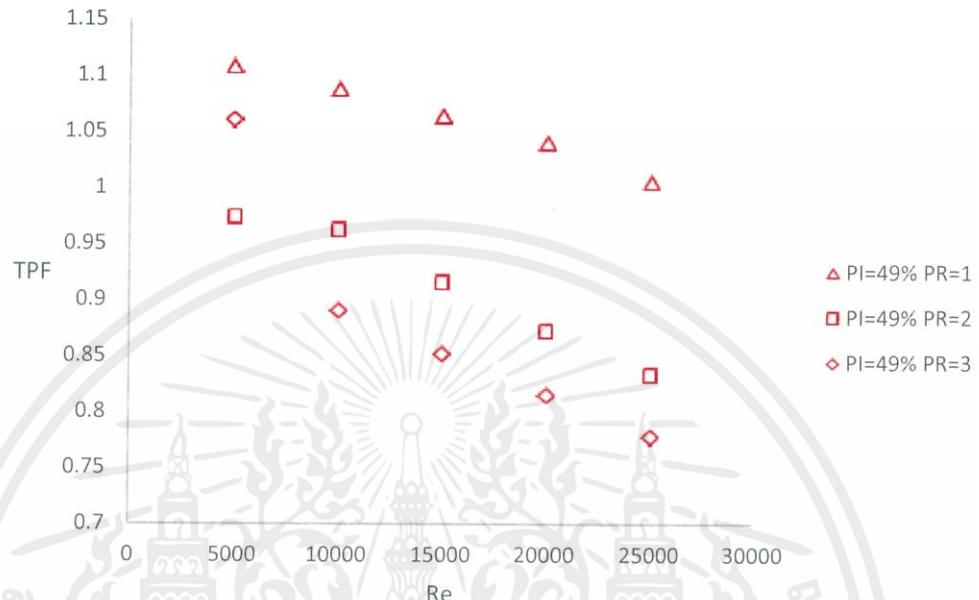
รูปที่ 4.16 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทานต่อตัวประกอบความเสียดทานในท่อเปล่า

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์

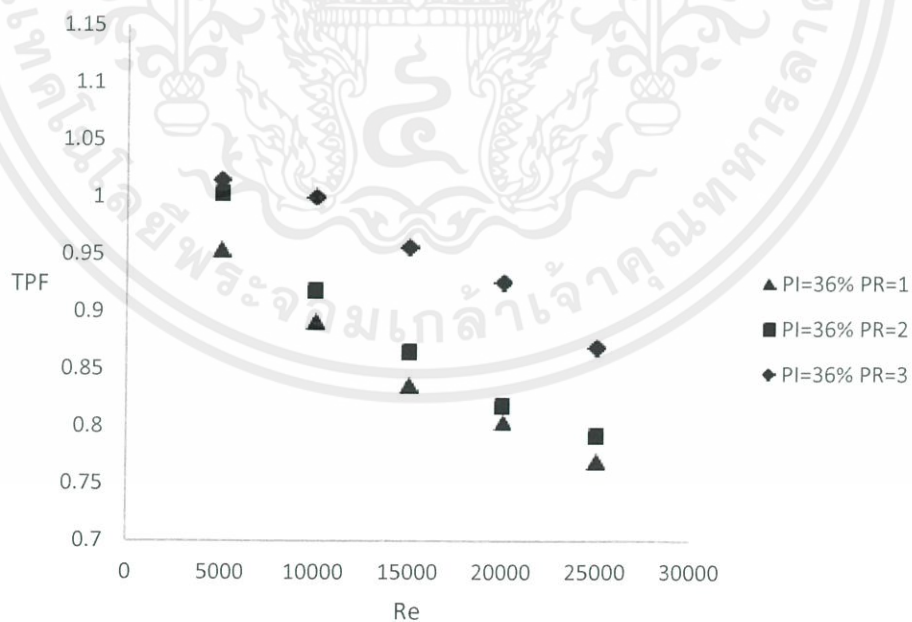
ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการเพิ่มความปั่นป่วนในกระแสอากาศ สิ่งที่จะเกิดขึ้นนอกเหนือการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน นั่นก็คือความดันตกที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะทราบถึงสมรรถนะที่เกิดขึ้น จึงใช้ตัวแปร สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Thermal performance factor) ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็น $(Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3}$ จากรูปที่ 4.17 4.18 แสดงแผนภูมิระหว่างสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและเลขเรย์โนลด์ พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจะลดลง เป็นเพราะเมื่อเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นทำให้ความปั่นป่วนในกระแสอากาศสูงขึ้น ค่า (Nu/Nu_0) ลดต่ำลง พร้อมกันนั้นค่า $(f/f_0)^{1/3}$ เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนลดต่ำลง ซึ่งจากรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่า เมื่อใช้แผ่นกั้นที่มีอัตราส่วนช่องเปิด 49 เปอร์เซ็นต์ การลดระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นลงจะทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ในกลับกัน เมื่อใช้แผ่นกั้นที่มีอัตราส่วนช่องเปิด 36 เปอร์เซ็นต์ การลดระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นลงจะทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนลดลง เป็นเพราะแผ่นกั้นที่มีอัตราส่วนช่องเปิด 36 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดการไหลแบบเจ็ทแบบรุนแรง ทำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นมาก เมื่อลดระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น ทำให้จำนวนแผ่นกั้นมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความดันตกในท่อเป็นอย่างมาก ค่า $(f/f_0)^{1/3}$ เพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนลดลงมากเช่นกัน

จากรูปที่ 4.19 ทำให้ทราบว่าในการทดลองนี้ระยะห่างแผ่นกั้นและอัตราส่วนช่องเปิดที่ทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากที่สุดคือ ระยะห่างแผ่นกั้นที่สั้นที่สุด (PR=1) และอัตราส่วนช่องเปิด 49 เปอร์เซ็นต์ (PI=49%) เป็นเพราะว่า ที่ระยะห่างแผ่นกั้น PR=1 ทำให้เกิดการถ่ายเทความ

ร้อนได้มากที่สุด แต่การใช้ระยะห่างแผ่นกัน PR=1 อัตราส่วนช่องเปิด 36 เปอร์เซ็นต์นั้นทำให้ค่า $(f/f_0)^{1/3}$ เพิ่มสูงมากกว่า ทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่ากรณี ระยะห่างแผ่นกัน PR=1 อัตราส่วนช่องเปิด 49 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นกรณีที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากและไม่เกิดแรงเสียดทานจากความดันลมมากเกินไป

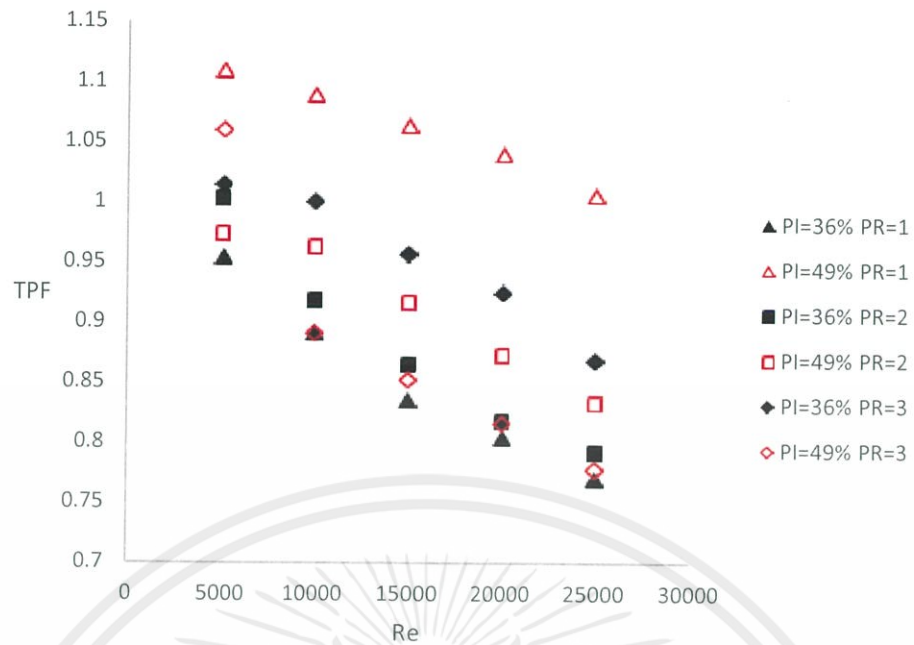


รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ระยะห่างของแผ่นกันต่างๆ อัตราส่วนช่องเปิด 49%



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ระยะห่างของแผ่นกันต่างๆ อัตราส่วนช่องเปิด 36%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ภาพรวมสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. จากผลการทดลองพบว่า การใส่แผ่นกั้นภายในท่อสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับผิวท่อทรงกระบอก โดยแสดงในตัวแปรเลขนัยเชิงสถิติที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด 6.3 เท่า เมื่อใส่แผ่นกั้นที่มีระยะห่าง $PR=1$ และอัตราส่วนช่องเปิด 36% ที่เลขเรย์โนลด์ 5,000 เทียบกับกรณีที่ไม่ใส่แผ่นกั้น
2. การใส่แผ่นกั้นภายในท่อจะทำให้เกิดความดันลดภายในท่อทรงกระบอก ซึ่งแสดงในรูปของตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นมากที่สุด 365 เท่า เมื่อใส่แผ่นกั้นที่มีระยะห่าง $PR=1$ และอัตราส่วนช่องเปิด 36% ที่เลขเรย์โนลด์ 25,000 เทียบกับกรณีที่ไม่ใส่แผ่นกั้น
3. สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเป็น 1.1 เมื่อใส่แผ่นกั้นที่มีระยะห่าง $PR=1$ และอัตราส่วนช่องเปิด 49% ที่เลขเรย์โนลด์ 5,000
4. การเพิ่มระยะของแผ่นกั้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนลดลงและส่งผลให้ตัวประกอบความเสียดทานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่แสดงผลสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน
5. การเพิ่มอัตราส่วนช่องเปิดของแผ่นกั้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนลดลงและส่งผลให้ตัวประกอบความเสียดทานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และแสดงผลสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดที่ $PR=1$

บรรณานุกรม

- [1] Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn. (2011). **Principle of heat transfer** (7thed). Cengage Learning.
- [2] Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, Devid P. Dewitt. (2011). **Fundamental of heat and mass transfer** (7thed). John Wiley & Sons.
- [3] Yunus A. Cengel. (2002). **Heat transfer** (2nded). McGraw-Hill Higher Education.
- [4] Alok Kumar, Sunil Chamoli, Manoj Kumar. (2016). **Experimental investigation on thermal performance and fluid flow characteristics in circular cylindrical tube with circular perforated ring inserts**. Experimental Thermal and Fluid Science Journal.
- [5] Smith Eiamsa-ard, Chinaruk Thianpong, Petpices Eiamsa-ard, Pongjet Promvonge. (2009). **Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert**. International Communications in Heat and Mass Transfer Journal.
- [6] V. Kongkaitpaiboon, 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 Journal.
- [7] N. Piriyarungrod, S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, M. Pimsarn, K. Nanan. (2015). **Heat transfer enhancement by tapered twisted tape inserts**. Chemical Engineering and Processing Journal.
- [8] Sompol Skullong, Pongjet Promvonge, Nuthvipa Jayranaiwachira, Chinaruk Thianpongb. (2016). **Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts**. Chemical Engineering and Processing Journal.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการคำนวณออกแบบการทดลอง

1. การคำนวณขนาดของท่อส่วนการทดลอง

เนื่องจากใช้เครื่องเป่าอากาศที่มีอัตราไหลเชิงปริมาตรสูงสุด (Q_{max}) เป็น 0.14 ลูกบาศก์เมตรต่อ วินาที เมื่อการทดลองกำหนดให้ ทดลองในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5,000 ถึง 25,000 โดยประมาณ คำนวณอากาศภายในชุดทดลองมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะมีค่าความหนืดสมบูรณ์ของของไหล (μ) เป็น 1.87×10^{-5} กิโลกรัมต่อเมตรวินาที และความหนาแน่น (ρ) เป็น 1.16 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากสมการ

$$Re_D \equiv \frac{\rho u_m D}{\mu}$$

เมื่อแทนค่าเลขเรย์โนลด์สูงสุดเป็น 23,000 และแทนค่าความหนืดและความหนาแน่นแล้ว จะได้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางมากที่สุดของท่อที่ควรจะใช้เป็น

$$D \leq 40 \text{ เซนติเมตร}$$

ซึ่งหมายความว่า ควรใช้ท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 40 เซนติเมตร เพราะขนาดท่อ 40 เซนติเมตรที่คำนวณมาดังกล่าว เมื่อใช้ความเร็วสูงสุดของเครื่องเป่าอากาศจะทำให้ได้เลขเรย์โนลด์สูงสุดเป็น 23,000 และสามารถลดความเร็วอากาศเพื่อลดเลขเรย์โนลด์ลงได้ แต่ทั้งนี้ไม่ควรใช้เส้นผ่าศูนย์กลางเล็กจนเกินไป เนื่องจาก อาจทำให้เกิดความยากลำบากต่อการทดลอง และเนื่องจากท่อที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร ใหญ่เกินความจำเป็น จึงเลือกใช้เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.508 เซนติเมตร หรือ 50.8 มิลลิเมตร

$$D = 50.8 \text{ มิลลิเมตร}$$

หลังจากทราบค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อแล้ว สามารถหาระยะปรับตัวที่ทางเข้าของชุดทดลองเมื่อมีการไหลแบบปั่นป่วนได้จากสมการ

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

เมื่อแทนค่า $D = 50.8$ มิลลิเมตร จะสามารถหาค่าระยะปรับตัวทางไฮโดรไดนามิกส์ ($x_{fd,h}$) ได้เป็น

$$0.508 \text{ เมตร} < x_{fd,h} < 3.048 \text{ เมตร}$$

สำหรับการทดลองนี้จะใช้ค่าที่เหมาะสมคือ

$$x_{fd,h} = 2 \text{ เมตร}$$

เนื่องจากไม่ยาวเกินไป และอยู่ในช่วงความยาวที่สามารถใช้งานได้ในช่วงเงื่อนไขความยาว ช่วงการปรับตัว ส่วนช่วงความยาวส่วนการทดลอง

2. การคำนวณความยาวของท่อส่วนทดลองและส่วนทางออก

อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยอิงจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้เพื่อหาความยาวที่เหมาะสมจากตารางที่ ก.1

3. การเลือกวัสดุท่อในส่วนของการทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้ท่อที่ทำจากทองแดงที่มีความหนาไม่มากและไม่บางมากจนเกินไป เนื่องจากต้องวัดอุณหภูมิที่ผิวท่อภายใน ซึ่งการใช้วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง เช่น ทองแดง ทำให้ความร้อนกระจายบนผิวท่อได้ดี เมื่อวัดอุณหภูมิผิวท่อภายใน จะสามารถวัดที่ผิวท่อ ด้านนอกได้ เนื่องจากมีการกระจายตัวของความร้อนทั่วถึง

4. การคำนวณขนาดของฮีตเตอร์แบบรีดท่อ

ฮีตเตอร์แบบขดลวด จะถูกติดตั้งในบริเวณของส่วนทดลอง เพื่อให้ความร้อนกับผิวของท่อแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ โดยใช้ฮีตเตอร์ทั้งหมด 8 ตัว ความยาวตัวละ 8 เซนติเมตร ฮีตเตอร์แต่ละตัวมีกำลัง 400 วัตต์ โดยหลักการหาค่ากำลังโดยรวมของฮีตเตอร์ได้แสดงไว้ดังต่อไปนี้

เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้มีความสามารถในการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้ต่ำสุดประมาณ ± 0.1 องศาเซลเซียส หมายความว่าผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่ทางเข้าและทางออก ($T_{m,o} - T_{m,i}$) ควรจะมากกว่า 0.1 องศาเซลเซียส ในการทดลองเพื่อให้เห็นผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่ทางเข้าและทางออกอย่างชัดเจนและความคาดเคลื่อนต่ำ จึงกำหนดให้

$$(T_{m,o} - T_{m,i}) > 10$$

เมื่อ $(T_{m,o} - T_{m,i}) = 10$ จะหาพลังงานการถ่ายเทความร้อนได้จาก

$$\dot{q} = \dot{m}c_p(T_{m,o} - T_{m,i})$$

แทนค่า $\dot{m} = \rho u_m A_c = \rho Q_{max} = 1.16 \times 0.14 = 0.16 \text{ kg/s}$ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ที่ความดันคงที่ (c_p) เป็น $1.005 \times 10^3 \text{ J/kg} \times K$

$$\dot{q} = (0.16)(1.005 \times 10^3)(10)$$

$$\dot{q} = 1.608 \times 10^3 \text{ W}$$

โดยปกติแล้วเครื่องทำความร้อนจะไม่สามารถมีประสิทธิภาพได้ 100% เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนไปบางส่วนจึงมีประสิทธิภาพได้ประมาณ 80%

$$0.8 \times \dot{q} = 0.8 \times (1.608 \times 10^3) = 1.286 \times 10^3 \text{ W}$$

จะเห็นได้ว่าถ้าเลือกใช้เครื่องทำความร้อนตามที่คำนวณได้โดยไม่เผื่อค่าการสูญเสียความร้อน เมื่อคำนวณค่าสูญเสียความร้อนแล้ว พลังงานความร้อนที่ได้รับจะน้อยลง ทำให้ผลต่างของอุณหภูมิเปลี่ยนไป ดังนั้นถ้าต้องการให้ผลต่างของอุณหภูมิเป็นดังที่คำนวณไว้ จะต้องเลือกเครื่องทำความร้อนเพื่อค่าการสูญเสียความร้อนตัว

$$\frac{1.608 \times 10^3}{0.8} = 2.01 \times 10^3 \text{ W}$$

เมื่อต้องการหาฟลักซ์ความร้อนของพื้นที่ผิวท่อ จะได้

$$\frac{\dot{q}}{A_c} = \frac{\dot{q}}{2\pi(D/2)L} = \frac{2.01 \times 10^3}{2 \times (22/7) \times (0.063/2) \times 1.5} \text{ W/m}^2$$

$$\frac{\dot{q}}{A_c} = 6,767.68 \text{ W/m}^2$$

จากการคำนวณข้างต้น จะเห็นได้ว่าการเลือกใช้ฮีตเตอร์ 8 ตัว ตัวละ 400 วัตต์ทำให้กำลังไฟโดยรวมของฮีตเตอร์มีค่าเป็น 3,200 วัตต์ ซึ่งมีค่ามากพอต่อการใช้งาน

ตารางที่ ก.1 ขนาดและความยาวท่อจากงานวิจัยต่างๆ

Year	Article	Claming section (m)	Test section (m)	Inner diameter (mm)	Outer diameter (mm)	Reynolds number	Constant heat flux (W/m ²)	Type (Tube, Turbulator)
2016	Experimental investigation on thermal performance and fluid flow characteristics in circular cylindrical tube with circular perforated ring inserts (circular perforated ring)	2.5	1.4	68	-	6,000-23,000	1,000	-
2016	Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts (delta-wing tape)	2	1.2	50.2	54.3	4,200-25,500	3,500	Copper, Aluminum
2015	Heat transfer enhancement by tapered twisted tape inserts (twisted tape)	2	1.5	64	67	6,000-20,000	-	Copper, Aluminum
2010	Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators (hollow circular disk)	1.5	1.5	63	65	4,000-20,000	-	Copper, Aluminum
2009	Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert	-	1.25	47.5	50.5	4,000-20,000	-	Copper, Aluminum

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=36% PR=1

Re	T _{s1} (°C)	T _{s2} (°C)	T _{s3} (°C)	T _{s4} (°C)	T _{s5} (°C)	T _{s6} (°C)	T _{s7} (°C)	T _s (°C)	T _{m,i} (°C)	T _{m,o} (°C)	Nu
5000	39.7	41.5	42.7	42.1	44.6	43.6	44.7	42.70	33.7	46.5	150.51
10000	40.6	41.1	44	43.5	46.8	45.6	46.5	44.01	34.3	48.4	312.35
15000	41.8	42	44.1	43.7	46.8	46	46.7	44.44	34.8	48.5	447.82
20000	40.8	41	41.8	42.4	44.9	45	46.4	43.19	35.2	46.5	593.67
25000	39.6	41	41.8	42.5	45.1	45.5	46.2	43.10	35.3	46.1	701.24

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=49% PR=1

Re	T _{s1} (°C)	T _{s2} (°C)	T _{s3} (°C)	T _{s4} (°C)	T _{s5} (°C)	T _{s6} (°C)	T _{s7} (°C)	T _s (°C)	T _{m,i} (°C)	T _{m,o} (°C)	Nu
5000	38.2	37.9	39.6	39.5	41.4	41	40.2	39.69	32.6	42.3	132.64
10000	39.3	39.6	41.1	41.2	43.3	43	43.4	41.56	33.3	44.9	276.63
15000	39.4	39.7	41.8	41.4	43.1	43.5	44	41.84	33.9	44.9	411.08
20000	39.8	40.2	41.9	42.8	44.2	44.5	45	42.63	34.4	45.8	553.24
25000	42	43.6	44.7	44.8	45.7	45.8	46	44.66	34.5	48.3	660.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=36% PR=2

Re	T _{s1} (°C)	T _{s2} (°C)	T _{s3} (°C)	T _{s4} (°C)	T _{s5} (°C)	T _{s6} (°C)	T _{s7} (°C)	T _s (°C)	T _{m,i} (°C)	T _{m,o} (°C)	Nu
5000	38.6	38.9	40.8	40.6	42.2	41.6	41.3	40.57	31.7	43.6	124.53
10000	37.2	37.8	38.4	38.8	40.4	40.1	40.5	39.03	32.3	41.4	248.31
15000	38	38	39.8	39.5	41	41.2	41.9	39.91	32.9	42.2	359.10
20000	38	37.9	40	39.9	41.1	42	42.2	40.16	33	42.4	467.82
25000	38.6	40	40.5	41	41.9	42	42.3	40.90	33	43.1	555.25

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=49% PR=2

Re	T _{s1} (°C)	T _{s2} (°C)	T _{s3} (°C)	T _{s4} (°C)	T _{s5} (°C)	T _{s6} (°C)	T _{s7} (°C)	T _s (°C)	T _{m,i} (°C)	T _{m,o} (°C)	Nu
5000	39.1	39.2	40.4	40.4	42.6	41.8	41	40.64	32.1	42.3	90.57
10000	39.8	39.6	41.8	41.6	43.5	42.9	42.1	41.61	32.7	43.6	187.04
15000	39.8	39.9	41.3	41.8	44.1	43.5	42	41.77	33.3	43.5	274.91
20000	41.2	41.4	43.2	43.4	44.5	45	44.5	43.31	33.4	45.2	359.46
25000	40	40.5	41.4	41.5	42.7	44	44.5	42.09	33.7	43.3	420.62

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=49% PR=3

Re	T _{s1} (°C)	T _{s2} (°C)	T _{s3} (°C)	T _{s4} (°C)	T _{s5} (°C)	T _{s6} (°C)	T _{s7} (°C)	T _s (°C)	T _{m,i} (°C)	T _{m,o} (°C)	Nu
5000	38.2	38.3	39	39	41.5	41	40	39.57	32.4	41.8	113.05
10000	38.2	38.7	39.1	39.2	40.6	40.2	40	39.43	33.1	41.5	232.91
15000	37.8	38.3	39.8	39.7	40.3	40.1	40.8	39.54	33.7	41.3	339.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5(ต่อ) ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=49% PR=3

Re	T _{s1} (°C)	T _{s2} (°C)	T _{s3} (°C)	T _{s4} (°C)	T _{s5} (°C)	T _{s6} (°C)	T _{s7} (°C)	T _s (°C)	T _{m,i} (°C)	T _{m,o} (°C)	Nu
20000	39.6	39.6	41	41	41	41.3	41.4	40.70	34	42.7	452.72
25000	40.1	40.7	42	42	42.8	42.9	43	41.93	34.4	43.8	520.69

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้น PI=49% PR=3

Re	T _{s1} (°C)	T _{s2} (°C)	T _{s3} (°C)	T _{s4} (°C)	T _{s5} (°C)	T _{s6} (°C)	T _{s7} (°C)	T _s (°C)	T _{m,i} (°C)	T _{m,o} (°C)	Nu
5000	38	38.3	39	39	40.8	40.2	40	39.33	32.9	40.5	85.94
10000	40.5	40.8	42.1	41.8	42	42.1	42.6	41.70	33.5	42.7	150.83
15000	37.8	38.1	39.1	39.2	40.6	40.7	41	39.50	34	40	219.10
20000	38.5	38.8	40.2	39.9	41.4	41	41	40.11	34.4	40.6	290.02
25000	39.9	40.5	40.1	41.2	42.1	42	43	41.26	34.7	41.5	337.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
ผลการทดลองด้านความดันลด

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองด้านความดันลด แผ่นกั้น PI=36% PR=1

Re	Δh (m)	ΔP (Pa)	f
5000	0.039	380.8148	11.46919
10000	0.133	1298.676	10.49434
15000	0.299	2919.58	9.861149
20000	0.533	5204.469	9.728924
25000	0.833	8133.813	9.428577

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองด้านความดันลด แผ่นกั้น PI=49% PR=1

Re	Δh (m)	ΔP (Pa)	f
5000	0.017	165.9962	4.999392
10000	0.05	488.2241	4.002627
15000	0.112	1093.622	3.693808
20000	0.199	1943.132	3.632375
25000	0.311	3036.754	3.520153

ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองด้านความดันลด แผ่นกั้น PI=36% PR=2

Re	Δh (m)	ΔP (Pa)	f
5000	0.019	185.5251	5.587556
10000	0.062	605.3978	4.822463
15000	0.139	1357.263	4.58428
20000	0.246	2402.062	4.521509
25000	0.384	3749.561	4.299439

ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองด้านความดันลด แผ่นกั้น PI=49% PR=2

Re	Δh (m)	ΔP (Pa)	f
5000	0.008	78.11585	2.352655
10000	0.023	224.5831	1.788978
15000	0.052	507.753	1.731048
20000	0.092	898.3323	1.690971
25000	0.144	1406.085	1.603586

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองด้านความดันลด แผ่นกั้น PI=36% PR=3

Re	Δh (m)	ΔP (Pa)	f
5000	0.013	126.9383	4.044646
10000	0.039	380.8148	3.077289
15000	0.087	849.5099	2.869298
20000	0.154	1503.73	2.830538
25000	0.24	2343.476	2.687149

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองด้านความดันลด แผ่นกั้น PI=49% PR=3

Re	Δh (m)	ΔP (Pa)	f
5000	48.82241	0.005	1.555633
10000	146.4672	0.015	1.183573
15000	322.2279	0.033	1.088354
20000	576.1044	0.059	1.084427
25000	888.5678	0.091	1.018877