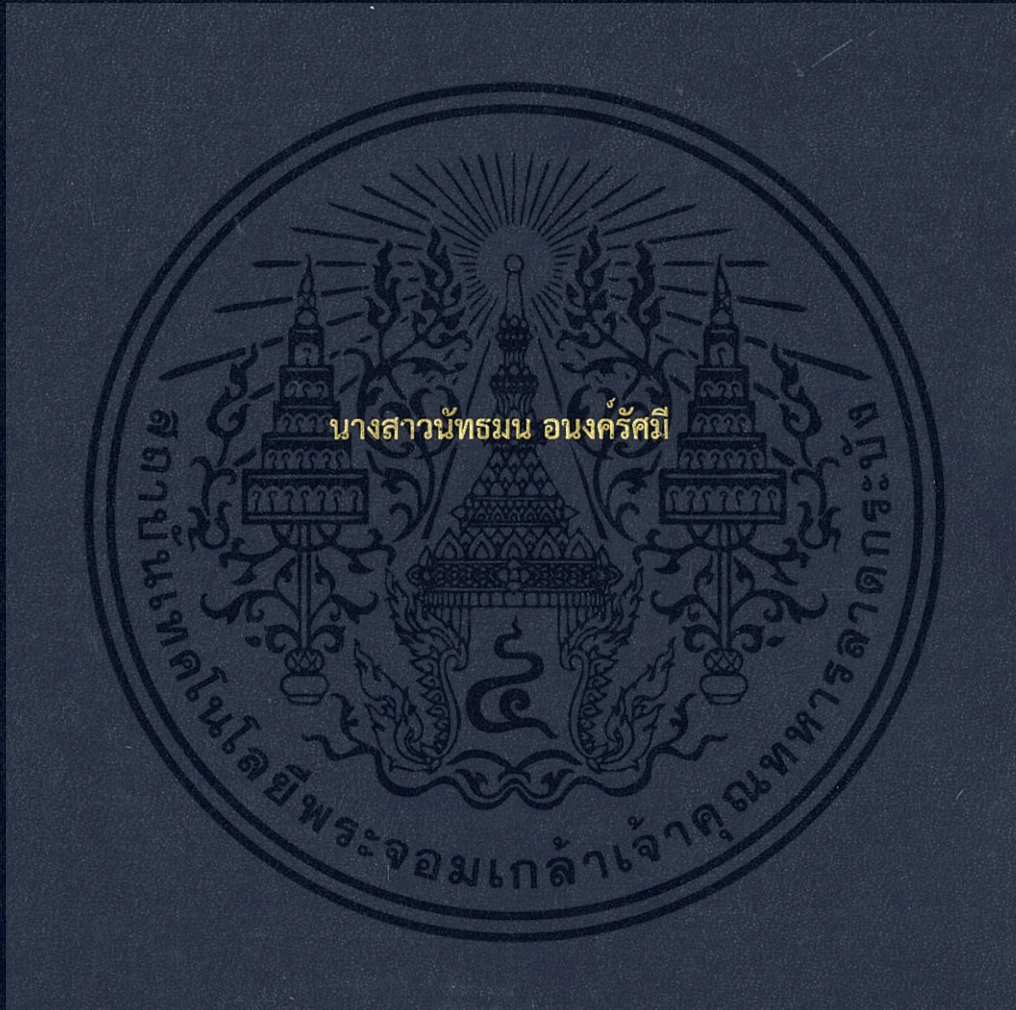


การเพิ่มการพาความร้อนและผลของความดันลดในท่อทรงกระบอกโดยการใส่แผ่นกัน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การเพิ่มการพาความร้อนและผลของความดันลดในท่อทรงกระบอกโดยการใส่แผ่นกัน



ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE ENHANCEMENT OF CONVECTION HEAT TRANSFER AND THE EFFECT OF
PRESSURE DROP IN A CIRCULAR TUBE BY INSERTING TURBULATOR



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
ACADAMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

การเพิ่มการพาความร้อนและผลของความดันลดในท่อทรงกระบอก
โดยการใส่แผ่นกัน

โดย

นางสาวนัทธมน อนงค์ศรีมี

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



(Signature)
.....ประธานกรรมการ
(อ. บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

(Signature)
.....กรรมการ
(ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)

(Signature)
.....กรรมการ
(ดร. ณัฐนนท์ ไพบูลย์ศิลป์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การเพิ่มการพาความร้อนและผลของความดันลดในท่อทรงกระบอก โดยการใส่แผ่นกัน
โดย	นางสาวนัทธมน อนงค์ศรีศรี
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ. บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการทดลองศึกษาวิธีเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเทอมของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและผลของความดันลดในเทอมของค่าตัวประกอบความเสียดทานในท่อทรงกระบอกโดยการใส่แผ่นกัน ซึ่งแผ่นกันที่นำมาติดตั้งจะเพิ่มความปั่นป่วนของอากาศที่ไหลภายในท่อและรบกวนชั้นความหนืดย่อยและชั้นปรับตัวบริเวณผนังท่อภายใน ท่อทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลองมีความยาว 1.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.08 เซนติเมตร การทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนชนิดของแผ่นกัน (โลหะ อะคริลิก และอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม) และปรับเปลี่ยนระยะ PR (1,2 และ 3) ซึ่งคือระยะห่างระหว่างแผ่นกันแต่ละแผ่น/เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และกำหนดเลขเรย์โนลเป็น 5,000 10,000 15,000 20,000 และ 25,000 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในเทอมของความสัมพันธ์ระหว่างเลขนีสเชิลด์กับเลขเรย์โนลค่าตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลและค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนล จากผลการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนและความดันลดในรูปของเลขนีสเชิลด์และตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลงเมื่อ PR เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เลขนีสเชิลด์จะเพิ่มขึ้นแต่ตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อเลขเรย์โนลเพิ่มขึ้น แผ่นกันอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1 เลขเรย์โนล 25,000 มีเลขนีสเชิลด์สูงสุดเท่ากับ 706 และที่ PR=3 เลขเรย์โนล 25,000 มีค่าตัวประกอบความเสียดทานต่ำสุดเท่ากับ 0.87 นอกจากนี้พบว่าแผ่นกันโลหะที่ PR=1 เลขเรย์โนล 10,000 พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.53

Report Title	The Enhancement of Convection Heat Transfer and The Effect of Pressure Drop in a Circular Tube by Inserting Turbulator
By	Miss. Natthamon Anongratsamee
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2017
Advisor	Mr. Boonchai Chotiviriyavanich

Abstract

This project studied the enhancement of heat transfer in terms of convective heat transfer coefficient and effect of pressure drop in terms of friction factor in a circular tube by inserting turbulator. Turbulator increases turbulent flow and disrupts the edge of viscous sublayer and edge of transitional boundary layer at internal tube wall. The circular test tube is 1.2 meters in length with internal diameter of 5.08 centimeters. In these experiments are varied turbulator types (metal, acrylic, octagonal acrylic) and are varied three different pitch ratios (1, 2 and 3), where PR is the distance between each turbulator/tube diameter. The Reynold numbers are also varied from 5,000 10,000 15,000 20,000 and 25,000, respectively. The experiment results obtained are correlated in terms of Nusselt number as a function of Reynold number, friction factor as a function of Reynold number and thermal performance as a function of Reynold number. The experimental results reveal that the heat transfer and pressure drop in the form of respective Nusselt number and friction factor from the turbulator tend to decrease with increasing PR. Additionally, Nusselt number increases with increasing Reynold number but Friction factor decreases with increasing Reynold number. The octagonal acrylic turbulator with PR = 1 at 25,000 of Reynold number yields the maximum Nusselt number about 706 and with PR=1 at 25,000 of Reynold number yields the minimum friction factor about 0.87. Additionally, the metal turbulator with PR=1 at 10,000 of Reynold number provides the highest thermal performance factor about 1.53

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคลากรหลายฝ่าย ทางผู้จัดทำขอขอบคุณ อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาในการทำงานวิจัยนี้ด้วยดี

ขอบคุณ คุณเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่ช่วยเหลือเรื่องอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยแก้ปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ในการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนในภาควิชาที่คอยให้กำลังใจและให้คำปรึกษาในการทำปริญญานิพนธ์อย่างดีเสมอมา ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่ได้ให้ความรู้ทั้งด้านวิชาการและคุณธรรมตลอดระยะเวลา 4 ปี

นัทธมน อนงค์รัมย์



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	I
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
สัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
2.1 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน	2
2.2 การไหลภายในท่อ	4
2.3 การพิจารณาทางไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamic considerations)	4
2.4 การพิจารณาทางความร้อน	7
2.4.1 สภาวะวะการไหล	7
2.5 การไหลแบบปั่นป่วนในท่อทรงกระบอก	10
2.6 สมรรถนะเชิงความร้อน	13
2.7 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน	14
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	16
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	16
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	21
4.1 ผลการถ่ายเทความร้อนโดยการใส่แผ่นกั้น	21
4.2 ผลของความดันลวดที่เกิดขึ้นในท่อเมื่อใส่แผ่นกั้น	25
4.3 สมรรถนะเชิงความร้อน	29
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	33
5.1 สรุปผลการทดลอง	33
5.2 ข้อเสนอแนะ	36
เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	38
ภาคผนวก ข การคำนวณ	46



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ชั้นขอบเขตทางไฮโดรไดนามิกส์ช่วงการไหลแบบราบเรียบภายในท่อทรงกระบอก	5
2.2 ตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลช่วงปรับตัวเต็มที่ในท่อทรงกระบอก	6
2.3 ชั้นขอบเขตทางความร้อนช่วงการไหลแบบราบเรียบภายในท่อทรงกระบอก	7
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์กับเลขเรย์โนลของอากาศที่ไหลผ่านท่อร้อน	10
ที่มีอุณหภูมิผิวท่อคงที่	
2.5 การไหลช่วงปั่นป่วนเต็มที่สำหรับของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านท่อ	11
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	16
3.2 แผ่นกั้นโลหะ	17
3.3 แผ่นกั้นอะคริลิก	17
3.4 แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม	17
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์และเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นโลหะที่ PR=1,2,3	21
กับท่อเปล่า	
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์และเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นอะคริลิกที่ PR=1,2,3	21
กับท่อเปล่า	
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์และเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม	22
ที่ PR=1,2,3 กับท่อเปล่า	
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์และเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นโลหะ แผ่นกั้นอะคริลิก	23
และแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1 กับท่อเปล่า	
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์และเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นโลหะ แผ่นกั้นอะคริลิก	23
และแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=2 กับท่อเปล่า	
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์และเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นโลหะ แผ่นกั้นอะคริลิก	24
และแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=3 กับท่อเปล่า	
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นอะคริลิก	25
ที่ PR=1,2,3 กับท่อเปล่า	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้น อะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1,2,3 กับท่อเปล่า	26
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้น อะคริลิกกับแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1 กับท่อเปล่า	27
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้น อะคริลิกกับแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=2 กับท่อเปล่า	27
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้น อะคริลิกกับแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=3 กับท่อเปล่า	28
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นโลหะ ที่ PR=1,2,3	29
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นอะคริลิก ที่ PR=1,2 และ 3	29
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นอะคริลิก ทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1,2 และ 3	30
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นที่ PR=1	31
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นที่ PR=2	31
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นที่ PR=3	32

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 แสดงเลขนับเซลล์ของแผ่นกั้นแต่ละชนิดที่ PR=1,2 และ 3.....	33
5.2 แสดงตัวประกอบความเสียหายของแผ่นกั้นแต่ละชนิดที่ PR=1,2 และ 3.....	34
5.3 แสดงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของแผ่นกั้นแต่ละชนิดที่ PR=1,2 และ 3.....	35
1ก ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นโลหะที่ PR=1.....	39
2ก ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นโลหะที่ PR=2.....	39
3ก ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นโลหะที่ PR=3.....	39
4ก ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นอะคริลิกที่ PR=1.....	40
5ก ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นอะคริลิกที่ PR=2.....	40
6ก ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นอะคริลิกที่ PR=3.....	40
7ก ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1.....	41
8ก ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=2.....	41
9ก ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=3.....	41
10ก ผลการทดลองความดันลุดที่เกิดขึ้นภายในท่อในรูปตัวประกอบความเสียหาย.....	42
เมื่อใช้แผ่นกั้นทรงแผ่นกลมที่ PR=1	
11ก ผลการทดลองความดันลุดที่เกิดขึ้นภายในท่อในรูปตัวประกอบความเสียหาย.....	42
เมื่อใช้แผ่นกั้นทรงแผ่นกลมที่ PR=2	
12ก ผลการทดลองความดันลุดที่เกิดขึ้นภายในท่อในรูปตัวประกอบความเสียหาย.....	42
เมื่อใช้แผ่นกั้นทรงแผ่นกลมที่ PR=3	
13ก ผลการทดลองความดันลุดที่เกิดขึ้นภายในท่อในรูปตัวประกอบความเสียหาย.....	43
เมื่อใช้แผ่นกั้นทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
14ก ผลการทดลองความดันลวดที่เกิดขึ้นภายในท่อในรูปตัวประกอบความเสียดทาน 43 เมื่อใช้แผ่นกั้นทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=2	43
15ก ผลการทดลองความดันลวดที่เกิดขึ้นภายในท่อในรูปตัวประกอบความเสียดทาน 43 เมื่อใช้แผ่นกั้นทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=3	43
16ก ตารางแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศที่ความดันบรรยากาศมาตรฐาน 44 (หน่วย SI) (1)	44
17ก ตารางแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศที่ความดันบรรยากาศมาตรฐาน 45 (หน่วย SI) (2)	45



สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Ac_i	พื้นที่หน้าตัดภายในของท่อ	(m ²)
Aw_i	พื้นที่ผิวด้านในของท่อ	(m ²)
c_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ	(J/kg · K)
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ	(m)
f	ตัวประกอบความเสียดทาน	(Dimensionless number)
f_0	ตัวประกอบความเสียดทานของท่อเปล่า	(Dimensionless number)
\bar{h}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย	(W/m ² · K)
k_f	ค่าการนำความร้อน	(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
L	ความยาวท่อ	(m)
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล	(kg/s)
Nu	เลขนัสเซลต์	(Dimensionless number)
Nu_0	ตัวประกอบความเสียดทานของท่อเปล่า	(Dimensionless number)
Pr	เลขพรันด์เทิล	(Dimensionless number)
ΔP	ความดันลด	(Pa)
q_s	ฟลักซ์ความร้อน	(W/m ²)
q_s''	อัตราการถ่ายเทความร้อน	(W/K)
Re	เลขเรย์โนลด์	(Dimensionless number)
T_w	อุณหภูมิผนังท่อ	(°C)
T_o	อุณหภูมิของไหลขาออกท่อ	(°C)
T_i	อุณหภูมิของไหลขาเข้าท่อ	(°C)
T_b	อุณหภูมิของไหลภายในท่อเฉลี่ย	(°C)
$u_{m,v}$	ความเร็วของไหล	(m/s)
$x_{fd,h}$	ความยาวช่วงปรับตัวทางไฮโดรไดนามิกส์จากทางเข้า	(m)
$x_{fd,t}$	ความยาวช่วงปรับตัวทางความร้อนจากทางเข้า	(m)
δ	ความหนาของชั้นปรับตัวทางไฮโดรไดนามิกส์	(m)
δ_t	ความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน	(m)

X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μ	ความหนืดพลวัตของของไหล	$(kg/m^2 \cdot s)$
ρ	ความหนาแน่นของไหล	(kg/m^2)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างมากในทางอุตสาหกรรมและเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่างๆทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น ในอุตสาหกรรมน้ำมันจะใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการทำให้น้ำมันดิบร้อนขึ้นหรือทำให้ไอที่ออกจากหอกลั่นเกิดการกลั่นตัวเป็นของเหลวหรือใช้ลดอุณหภูมิของน้ำมันหรือก๊าซ ในทำนองเดียวกันกับในอุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ก็ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ ลดอุณหภูมิหรือหมุนเวียนความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่ ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลเคลื่อนที่กับพื้นที่ผิวที่ของไหลไหลผ่านได้ดีมากน้อยเพียงใด โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ลักษณะการไหล ลักษณะพื้นที่ผิวที่ของไหลได้ไหลผ่าน เป็นต้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อทรงกระบอกใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวท่อ วิธีในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวท่อจะใช้การเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อน (Fins) หรือการใส่แผ่นกั้น (Turbulator) ซึ่งแผ่นกั้นจะทำให้การไหลของของไหลในท่อมีความปั่นป่วนและผสมกันมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใส่แผ่นกั้นจะก่อให้เกิดความดันลดภายในท่อเพิ่มขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาวิธีการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในท่อทรงกระบอกโดยใช้แผ่นกั้น
2. เพื่อศึกษาผลของความดันลดภายในท่อทรงกระบอกที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใส่แผ่นกั้น
3. เพื่อศึกษาผลของวัสดุที่ใช้ทำแผ่นกั้นในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อทรงกระบอก
4. เพื่อศึกษาผลของรูปร่างแผ่นกั้นในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและความดันลดที่เกิดขึ้น

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ทดลองการถ่ายเทความร้อนในท่อทรงกระบอกที่มีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่
2. ทดลองโดยใช้อากาศในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 ถึง 25,000
3. ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น ซึ่งแสดงในรูปอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น

ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (PR) โดยกำหนดกรณีศึกษา PR เป็น 1 2 และ 3

4. ศึกษาผลของรูปทรงแผ่นกั้น
5. ทดลองโดยใช้แผ่นกั้นที่ทำจากวัสดุโลหะและอะคริลิก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อทรงกระบอกโดยใช้แผ่นกั้น
2. ได้เรียนรู้เกี่ยวกับการทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้การทดลองมากยิ่งขึ้น
3. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการทดลองนี้ไปใช้งานกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) คือ การที่วัตถุที่มีอุณหภูมิต่างกัน วัตถุหนึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า วัตถุหนึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

2.1.1 การนำความร้อน (Conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านของแข็งหรือระหว่างของแข็งที่สัมผัสกัน โดยพลังงานความร้อนจะถ่ายเทจากของแข็งที่มีอุณหภูมิมากกว่าไปยังของแข็งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เช่น การสัมผัสวัตถุที่ร้อนจะทำให้มีอูรู้สึกร้อน

2.1.2 การพาความร้อน (Convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลที่มีการเคลื่อนที่กับของแข็ง อันเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน สามารถแบ่งการพาความร้อนได้เป็น 2 ประเภท

1.) การพาความร้อนแบบอิสระ (Natural convection) คือ การที่ของไหลเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับพื้นที่ผิวของแข็งโดยไม่มีแรงภายนอกมากระทำทำให้ของไหลเคลื่อนที่

2.) การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) คือ การที่ของไหลเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับพื้นที่ผิวของแข็งโดยมีแรงภายนอกมากระทำทำให้ของไหลเคลื่อนที่ เช่น แรงจากพัดลมหรือเครื่องเป่าอากาศ เป็นต้น

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยไม่อาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ความร้อนจะเคลื่อนที่ในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่มายังพื้นผิวโลก

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษการถ่ายเทความร้อนในท่อทรงกระบอก ซึ่งเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) กล่าวคือ ของไหลอาศัยแรงกระทำจากเครื่องเป่าอากาศทำให้ของไหลเคลื่อนที่สัมผัสพื้นผิวเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหลจะมีผลมากต่อการพาความร้อน

2.2 การไหลภายในท่อ [2]

สำหรับการไหลภายในท่อทรงกระบอก เทอมไร้นหน่วยที่ใช้บอกลักษณะการไหลว่าเป็นแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน คือ เลขเรย์โนลด์ (Reynold number) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{u_m D}{\nu} \quad (2.1)$$

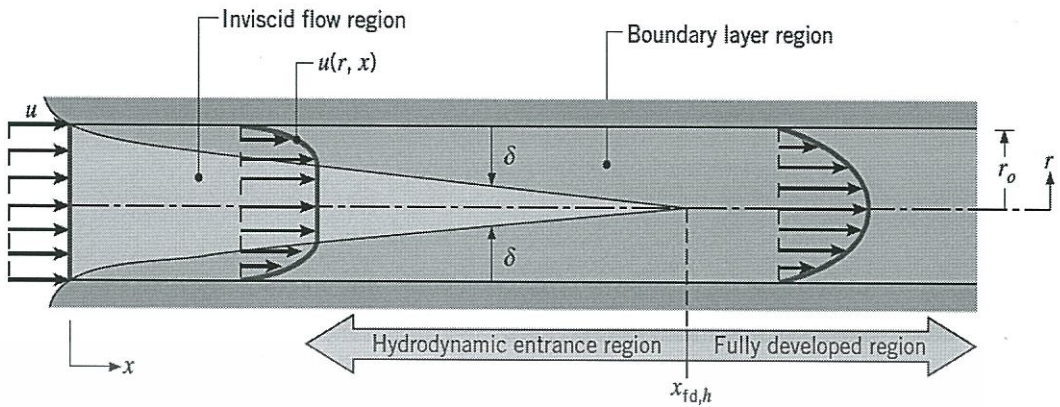
เมื่อ	ρ	คือ ความหนาแน่นของของไหล
	u_m	คือ ความเร็วอากาศเฉลี่ยในท่อ
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อภายในท่อ
	μ	คือ ความหนืดพลวัตของของไหล (Dynamic viscosity)
	ν	คือ ความหนืดจลน์ของของไหล (Kinematic viscosity)

การไหลภายในท่อช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะมีเลขเรย์โนลด์ มากกว่าหรือเท่ากับ 4,000 ($Re \geq 4,000$) ส่วนการไหลภายในท่อช่วงการไหลแบบราบเรียบจะมีเลขเรย์โนลด์ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2,300 ($Re \leq 2,300$)

2.3 การพิจารณาทางไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamic considerations) [1]

2.3.1 สภาวะการไหล (Flow Conditions)

เมื่อพิจารณาช่วงการไหลแบบราบเรียบภายในท่อทรงกระบอกรัศมี r_0 (รูป 2.1) ซึ่งของไหลจะไหลเข้าท่อด้วยความเร็วสม่ำเสมอ (Uniform velocity) เมื่อของไหลเริ่มสัมผัสกับพื้นผิวจะทำให้เกิดความหนืดและชั้นขอบเขตจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทาง x เพิ่มขึ้น เรียกว่า ช่วงปรับตัวทางไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamic entrance region) การเพิ่มขึ้นของชั้นขอบเขตนี้ไม่เพียงแต่จะทำให้ช่วงการไหลแบบไม่มีความหนืด (Inviscid flow region) ลดลงตามระยะทาง x แต่ยังทำให้ชั้นขอบเขตมีความหนาเพิ่มขึ้นตามระยะทางด้วยเช่นกัน จนกระทั่งที่ระยะความยาวค่าหนึ่ง ($x_{fd,h}$) ชั้นขอบเขตจะขยายตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดท่อ เรียกว่า ช่วงปรับตัวเต็มที่ทางไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamically fully developed)



รูปที่ 2.1 ชั้นขอบเขตทางไฮโดรไดนามิกส์ช่วงการไหลแบบราบเรียบภายในท่อทรงกระบอก

สำหรับการไหลแบบราบเรียบสามารถหาความยาวของช่วงการปรับตัวทางไฮโดรไดนามิกส์จากทางเข้าได้จากสมการดังนี้

$$\left(\frac{x_{fd,h}}{D_i}\right)_{laminar} \approx 0.05 Re_D \tag{2.2}$$

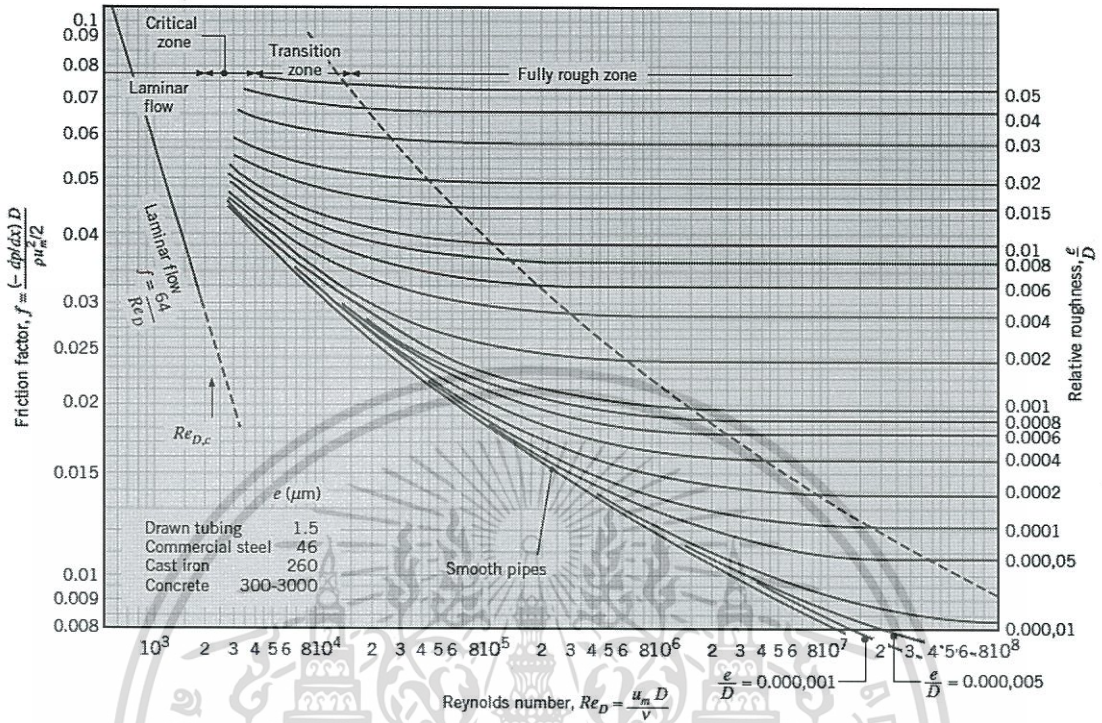
สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนสามารถหาความยาวของช่วงการปรับตัวทางไฮโดรไดนามิกส์จากทางเข้าได้จากสมการดังนี้

$$10 \leq \left(\frac{x_{fd,h}}{D_i}\right)_{turbulent} \leq 60 \tag{2.3}$$

เมื่อ $x_{fd,h}$ คือ ความยาวช่วงปรับตัวทางไฮโดรไดนามิกส์จากทางเข้า
 D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

2.3.2 ตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor) และความดันลด (Pressure drop) [1]

ในด้านวิศวกรรมจะให้ความสนใจกับความดันลดในท่อเนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถนำไปวิเคราะห์หากำลังของพัดลมหรือปั๊มได้ ในการหาความดันลดสามารถหาได้จากตัวประกอบความเสียดทาน (f) ซึ่งอาจใช้กราฟของ Moody (รูปที่ 2.2) หรือใช้สมการในการคำนวณ



รูปที่ 2.2 ตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลช่วงปรับตัวเต็มที่ในท่อทรงกระบอก สำหรับการหาตัวประกอบความเสียดทานในช่วงการไหลแบบราบเรียบสามารถหาได้จาก

$$f = \frac{64}{Re_D} \tag{2.4}$$

สำหรับการหาตัวประกอบความเสียดทานในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่มีเลขเรย์โนลด์์มาก ($3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$) สามารถหาได้จากสมการของ Petukhov (Petukhov's equation)

$$f = (0.790 \ln Re_D - 1.64)^{-2} \tag{2.5}$$

สมการตัวประกอบความเสียดทานจากกราฟของ Moody (รูปที่ 2.2) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$f = \frac{\left(-\frac{dp}{dx}\right) D}{\rho u_m^2 / 2} \tag{2.6}$$

เมื่อแทนตัวประกอบความเสียดทานจากสมการ 2.5 ลงในสมการ 2.6 จะสามารถหาความดันลดได้จากสมการ

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{f\rho u_m^2/2}{D} \quad (2.7)$$

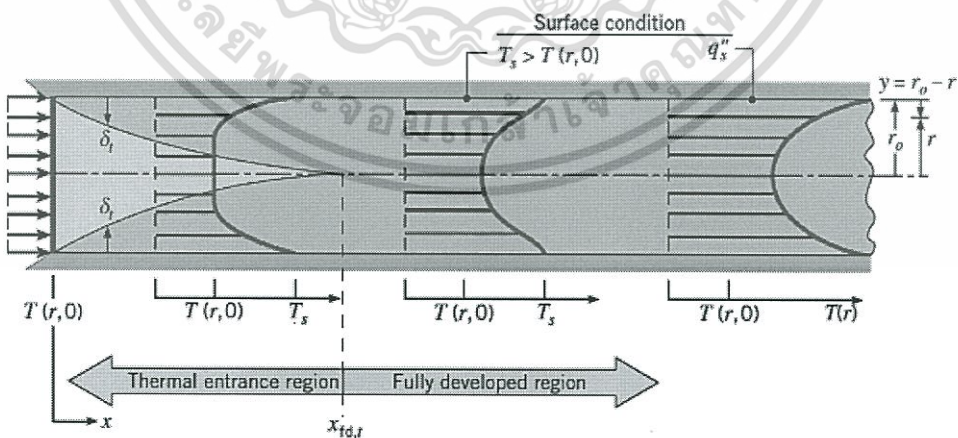
ดังนั้น เมื่อหาความดันลดตลอดช่วงความยาวท่อ

$$\Delta p = - \int_{p_1}^{p_2} dp = f \frac{\rho u_m^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx = f \frac{\rho u_m^2}{2D} (x_2 - x_1) \quad (2.8)$$

2.4 การพิจารณาทางความร้อน (Thermal considerations) [1]

2.4.1 สภาวะว่การไหล

เมื่อของไหลไหลเข้าท่ออุณหภูมิสม่ำเสมอ (Uniform temperature) $T(r,0)$ ถ้าอุณหภูมิของไหลต่ำกว่าอุณหภูมิที่ผิวท่อจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน จะทำให้เริ่มมีการพัฒนาช่วงปรับตัวทางความร้อน (Thermal entrance region) และสภาวะที่ผิวท่อถูกกำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวท่อคงที่ (T_s) หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่ (q_s'') จะทำให้เกิดช่วงปรับตัวเต็มที่ทางความร้อน (Thermal fully developed) ณ ค่าความยาวตั้งแต่ $x_{fd,t}$ ทำให้รูปร่างของ Temperature profile ที่ช่วงนี้ $T(r, x)$ มีลักษณะแตกต่างไปจากเริ่มต้น



รูปที่ 2.3 ชั้นขอบเขตทางความร้อนช่วงการไหลแบบราบเรียบภายในท่อทรงกระบอก

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ สามารถหาค่าความยาวของช่วงปรับตัวทางความร้อนทางเข้า (Thermal entry length) ได้จากสมการดังนี้

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D_i}\right)_{laminar} \approx 0.05 Re_D Pr \quad (2.9)$$

เมื่อ $x_{fd,t}$ คือ ความยาวช่วงปรับตัวทางความร้อน

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

Pr คือ เลขพลันด์เทิล (Prandtl number)

สำหรับการไหลแบบราบเรียบได้จากสมการดังนี้ โดยทุกตัวแปรจะใช้ ณ สภาวะอุณหภูมิต่อ

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2.10)$$

เมื่อ c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่

μ คือ ความหนืดจลน์ (Kinematic viscosity) ของของไหล

k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของของไหล

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะไม่ขึ้นอยู่กับการพลันด์เทิล สามารถหาได้จากสมการ

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D_i}\right)_{turbulent} = 10 \quad (2.11)$$

2.4.2 ชั้นขอบเขตการพาความร้อน (The convection boundary layer)

ชั้นขอบเขตทางความร้อนจะพัฒนาขึ้น เมื่อของไหลและพื้นผิวที่สัมผัสมีอุณหภูมิแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลที่สัมผัสกับพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่อ (Isothermal flat plate) (รูปที่ 2.3) ที่ขอบนำ (Leading edge) จะมีโปรไฟล์อุณหภูมิ (Temperature profile) ($T(r) = T_\infty$) คงที่ แต่บริเวณพื้นผิวที่สัมผัสกับของไหลจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานกับชั้นของไหลที่อยู่ติดกัน จึงเกิดเป็นเกรเดียนต์อุณหภูมิ ช่วงการไหลที่มีเกรเดียนต์อุณหภูมิหรือชั้นขอบเขตทางความร้อนจะมีความหนา δ_t

จาก รูปที่ 2.3 ที่ระยะทางใดๆ จากขอบนำ (Leading edge) เมื่อ $r=0$ พบว่า ของไหลมีความเร็วเท่ากับศูนย์ ดังนั้นฟลักซ์ความร้อนเฉพาะที่ (Local heat flux) จึงเกิดจากการนำความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการประยุกต์ใช้กฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ที่ $r=0$

$$q_s'' = -k_f \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} \quad (2.12)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวที่ $T(r_0, 0)$ กับของไหลในท่อ $T(r, 0)$ สามารถคำนวณได้จากสมการกฎของนิวตัน (Newton's law of cooling)

$$q_s'' = h(T_s - T_b) \quad (2.13)$$

เมื่อกำหนดให้ q_s เป็นฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant heat flux) ซึ่งคิดต่อพื้นที่ผิวทั้งหมด ดังนั้นจะได้สมการที่อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (\bar{h}) ดังสมการ

$$q_s = \bar{h} A_{wi} (T_s - T_b) \quad (2.14)$$

โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล (T_b) หาจาก

$$T_b = \frac{T_o + T_i}{2} \quad (2.15)$$

เมื่อนำ สมการ 2.12 และ 2.13 รวมกัน จะได้

$$\bar{h} = \frac{-k_f \partial T / \partial r|_{r=r_0}}{T_s - T_b} \quad (2.16)$$

เมื่อ	\bar{h}	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
	k_f	คือ ค่าการนำความร้อน
	T_s	คือ อุณหภูมิผิวท่อเฉลี่ย
	T_b	คือ อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย
	A_{wi}	คือ พื้นที่ผิวท่อภายใน
	T_o	คือ อุณหภูมิของไหลขาออก
	T_i	คือ อุณหภูมิของไหลขาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 สมดุลพลังงานความร้อน [1]

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ทำให้ของไหลในท่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิจากเข้าไปเป็นอุณหภูมิออกคำนวณได้จากสมการ

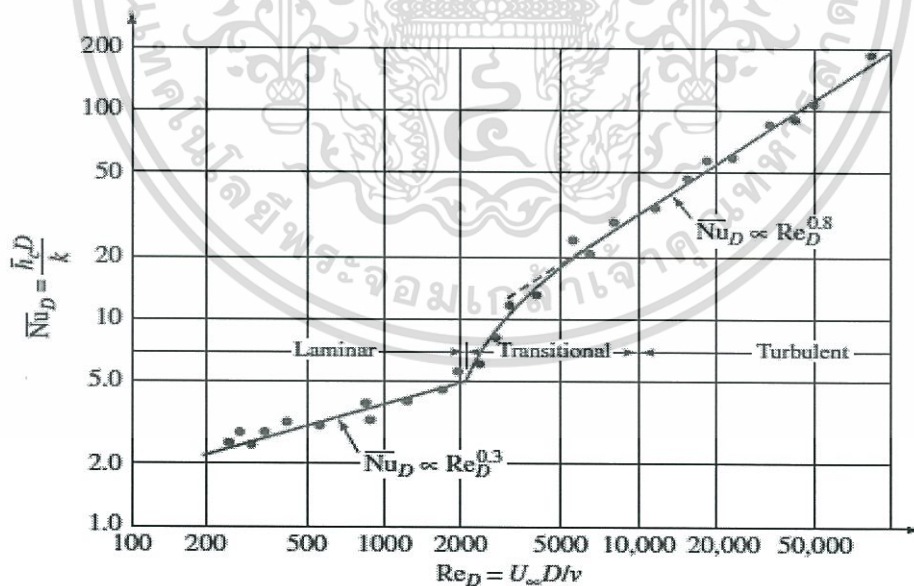
$$q = \dot{m}c_p(T_o - T_i) \quad (2.17)$$

เมื่อ	\dot{m}	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล
	c_p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล
	T_o	คือ อุณหภูมิอากาศขาออกท่อ
	T_i	คือ อุณหภูมิอากาศเข้าท่อ

2.5 การไหลแบบปั่นป่วนในท่อทรงกระบอก (Turbulent flow in circular tubes) [2]

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนอาจแสดงในเทอมของเลขนัสเซลต์ (Nusselt number : Nu) ซึ่งเป็นตัวเลขไร้มิติที่แสดงอัตราส่วนระหว่างการพาความร้อนต่อการนำความร้อน โดยเลขนัสเซลต์อาจหาได้จาก

2.5.1 ความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปกราฟ

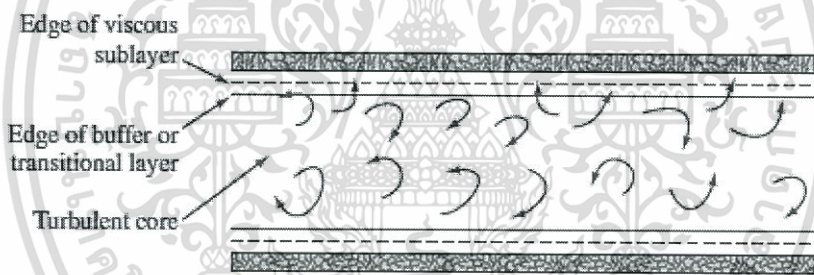


รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลต์กับเลขเรย์โนลด์ของอากาศที่ไหลผ่านท่อร้อนที่มีอุณหภูมิผิวท่อคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ($\overline{Nu_D}$) และ (Re_D) พบว่าสำหรับ การไหลแบบราบเรียบ ($Re < 2,100$) เลขนัสเซิลต์จะมีอัตราเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ต่อมาในช่วงปรับตัวการไหล (Transitional) ($2,000 < Re < 5,000$)และช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ($5,000 < Re < 8,000$) พบว่าเลขนัสเซิลต์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่ (Fully turbulent) ($Re \approx 8,000$) เลขนัสเซิลต์จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้าลง

พฤติกรรมของการไหลของของไหลที่เลขเรย์โนลด์มากกว่า 8,000 พบว่าของไหลภายในท่อจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่ ก่อให้เกิดกระแสหมุนวน (Eddies current) ยกเว้นบริเวณชั้นบางมากๆ ระหว่างของไหลกับพื้นผิวท่อ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากแรงหนืดที่มีอิทธิพลมากขึ้นเมื่อใกล้กับพื้นผิวท่อ จาก รูปที่ 2.5 ขอบของชั้นความหนืดย่อย (Edge of viscous sublayer) จะแสดงด้วยเส้นประ และขอบของชั้นปรับตัว (Edge of buffer or transitional layer) จะแสดงด้วยเส้นทึบ ซึ่งบริเวณชั้นนี้ของไหลจะอยู่ติดที่ผิวไม่มีการเคลื่อนที่ จึงไม่มีการพาความร้อนเกิดขึ้น ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากการนำความร้อนเป็นหลัก



รูปที่ 2.5 การไหลช่วงปั่นป่วนเต็มที่สำหรับของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านท่อ

ถ้าสามารถรบกวนขอบของชั้นความหนืดย่อย (Edge of viscous sublayer) และขอบของชั้นปรับตัว (Edge of buffer or transitional layer) จะทำให้กระแสหมุนวนมีการเคลื่อนที่ผ่านชั้นนี้ ทำให้เพิ่มการพาความร้อนมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient) จึงสูงขึ้น ส่งผลให้การนำความร้อนลดลง ดังนั้นการรบกวนขอบของชั้นความหนืดย่อยและขอบของชั้นปรับตัวจะส่งผลให้เลขนัสเซิลต์สูงขึ้น

2.5.2 การทดลอง

จากสมมุติฐานการทดลองให้ปริมาณความร้อนที่ทำให้ของไหลมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากขาเข้าไปเป็นขาออกเท่ากับปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนจากผิวท่อไปยังของไหล ดังนั้นจะหาค่า

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากการทดลองได้จากการนำสมการที่ (2.16) และ (2.18) เท่ากัน จึงสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้ดังนี้

$$\dot{m}c_p(T_o - T_i) = \bar{h}A_{wi}(T_s - T_b) \quad (2.18)$$

$$\bar{h} = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{A_{wi}(T_s - T_b)} \quad (2.21)$$

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณเลขนัสเซิลต์ได้จากสหสัมพันธ์ (Correlations) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลต์ที่เป็นฟังก์ชันกับเลขเรย์โนลและเลขพลันด์ ($Nu = f(Re, Pr)$) ดังสมการ เช่น

- สมการของ Dittus - Boelter

$$Nu_D = 0.023Re_D^{4/5}Pr^n \quad (2.19)$$

โดย $n = 0.4$ เมื่อ $(T_s > T_b)$

$n = 0.3$ เมื่อ $(T_s < T_b)$

ขอบเขตการใช้งาน

$$Re \geq 10,000$$

$$0.6 \leq Pr \leq 160$$

$$\frac{L}{D} \geq 10$$

- สมการของ Sieder - Tate

$$Nu = 0.027Re^{4/5}Pr^{1/3}\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \quad (2.20)$$

ขอบเขตการใช้สมการ

$$6,000 < Re < 10^7$$

$$0.7 \leq Pr \leq 16,700$$

$$\frac{L}{D} > 60$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สมการของ Petukhov-Popov

$$Nu = \left[\frac{\left(\frac{f}{8}\right) Re \cdot Pr}{1.07 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \right] \left(\frac{\mu_b}{\mu_s}\right)^n \quad (2.21)$$

โดย $n = 11$ เมื่อ $T_s > T_b$

$n = 0.25$ เมื่อ $T_s < T_b$

$n = 0$ เมื่อ ฟลักซ์ความร้อนคงที่

ขอบเขตการใช้งาน

$$10^4 < Re < 2000$$

$$0.5 < Pr < 200$$

$$0.8 < \frac{\mu_b}{\mu_s} < 40$$

2.6 สมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal performance factor : TPF)

สมรรถนะเชิงความร้อนเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นๆ โดยเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างเลขนีสเซลล์ต์กับตัวประกอบความเสียดทาน เลขนีสเซลล์ต์บอกให้ทราบถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหล ส่วนตัวประกอบความเสียดทานบอกให้ทราบถึงพลังงานที่ต้องให้กับของไหลเพื่อให้ของไหลเกิดการพาความร้อนแบบบังคับ ดังนั้นถ้าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงแสดงว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีโดยไม่ต้องให้พลังงานในการขับเคลื่อนของไหลมาก ซึ่งสมรรถนะเชิงความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการใส่แผ่นกั้นหาได้จากสมการ

$$TPF = \left(\frac{Nu}{Nu_0}\right) / \left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.22)$$

เมื่อ Nu คือ เลขนีสเซลล์ต์สำหรับการทดลองที่มีการติดตั้งแผ่นกั้น

Nu_0 คือ เลขนีสเซลล์ต์สำหรับการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นกั้น

f คือ ตัวประกอบความเสียดทานที่มีการติดตั้งแผ่นกั้น

f_0 คือ ตัวประกอบความเสียดทานที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นกั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Enhancement of Heat Transfer) [3]

สำหรับการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องพิจารณาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเป็นอันดับแรก สิ่งสำคัญในการลดต้นทุนคือการลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการลดพื้นที่ลงทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องลดลง ดังนั้นจึงมีการหาวิธีที่สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลักๆ ได้แก่ วิธีแบบ Active และ Passive

2.7.1 วิธีแบบ Active

เป็นการนำเอาแหล่งพลังงานภายนอกเข้ามาช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เช่น อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการสั่นของผิว ทำให้ของไหลเกิดการสั่นจึงสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้ดียิ่งขึ้น

2.7.2 วิธีแบบ Passive

เป็นการออกแบบลักษณะพื้นผิวของท่อแบบพิเศษต่างไปจากท่อผิวเรียบและปรับปรุงการไหลของของไหลเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้ดียิ่งขึ้นโดยไม่มีพลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น

- การเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น การติดตั้งครีป (Fin)
- เป็นการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการรบกวนชั้นความหนืด
- เป็นการปรับปรุงและเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น การติดตั้งครีปที่พื้นผิวภายในท่อหรือการใช้วัสดุที่มีรูพรุน (shaping/perforation)
- เป็นการใช้อุปกรณ์ติดตั้งในช่องการไหลเพื่อเพิ่มความปั่นป่วนของของไหล เช่น coiled tubes, twisted-tape inserts เป็นต้น
- เป็นการใช้อุปกรณ์ติดตั้งในช่องการไหลเพื่อทำให้เกิดการไหลแบบหมุน
- เป็นการทำให้พื้นผิวมีลักษณะแบบ wicking surface หรือ grooved surface นิยมใช้ในการไหลของของเหลวในการเดือดและควบแน่น
- สารเติมแต่งสำหรับแก๊สหรือของเหลวจะมีลักษณะเป็นหยดหรือเป็นอนุภาคของแข็ง

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

N. Virunsunthornkul [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานของอากาศภายในท่อยาว 1.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 5.08 เซนติเมตรด้วยการติดตั้งแผ่นกั้นเจาะรู โดยกำหนดเป็นอัตราส่วนของพื้นที่ที่ถูกเจาะต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของท่อเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PR 49% และ 36% และแต่ละ PR จะกำหนดอัตราส่วนระยะห่างของแผ่นกั้นเจาะรูต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น PI 1 2 และ 3 ทดลองการไหลของอากาศในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5,000 ถึง 25,000 จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ระยะห่างแผ่นกั้นและอัตราส่วนช่องเปิด PR 49% และ PI=1 จะทำให้สมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 1.1

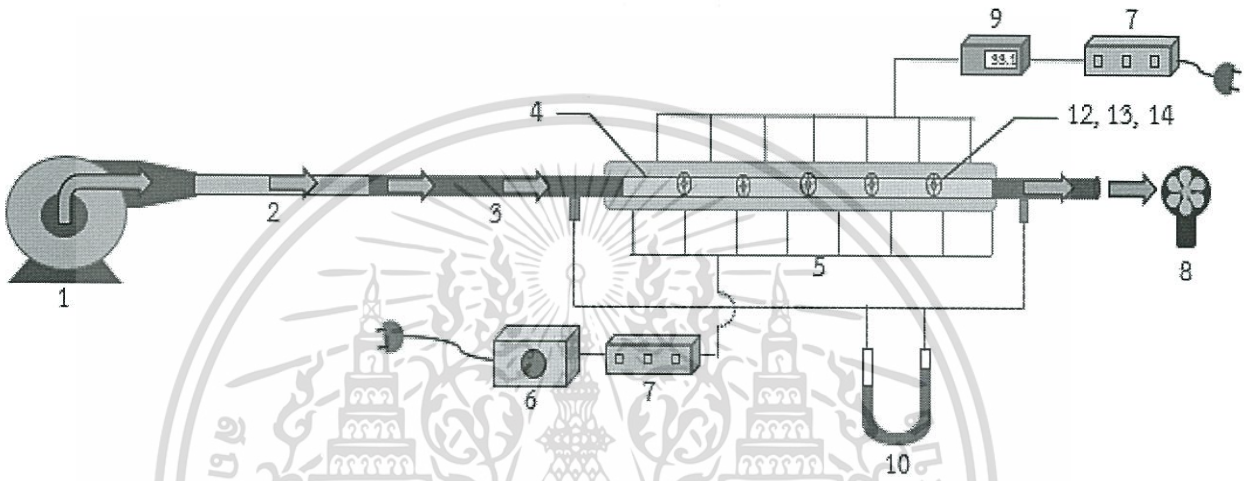
P. Promvong [5] ได้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อยาว 1.25 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5.1 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.8 เซนติเมตร ท่อมีการให้ความร้อนแบบปลั๊กซ์ ความร้อนคงที่ด้วยวิธีแบบ Passive โดยใช้แผ่นกั้นแบบ conical rings เพื่อศึกษาผลของแผ่นกั้นที่มีต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานที่เกิดขึ้น กำหนดแผ่นกั้น conical rings เป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นกั้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ($d/D = 0.5, 0.6, 0.7$) ในแต่ละอัตราส่วนจะแบ่งการจัดรูปแบบแผ่นกั้นเป็นสามแบบ คือ converging conical ring (CR) diverging conical ring (DR) และ converging-diverging conical ring (CDR) กำหนดให้อากาศอยู่ในเลขเรย์โนลด์ช่วง 6,000-26,000 จากการทดลองพบว่าการติดตั้งแผ่นกั้นในท่อส่งผลต่อสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อ เนื่องจากเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน และได้สรุปผลว่าการจัดแผ่นกั้นแบบ DR ทำให้เกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด

P. Promvong และ S. Eiamsa-ard [6] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในท่อยาว 1.25 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5.1 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.8 เซนติเมตร ตัวประกอบความเสียดทานและการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการใช้แผ่นกั้นแบบ conical ring และ twisted-tape มาผสมกัน โดยกำหนดอัตราส่วนการบิดของ twisted-tape เป็น $Y=3.75$ และ 7.5 ให้อากาศอยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 6,000-26,000 จากการทดลองพบว่าเลขนัสเซิลต์มีค่าประมาณ 4 ถึง 10% และการเพิ่มประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 4 ถึง 8% ซึ่งมากกว่าเมื่อเทียบกับการติดตั้ง conical ring เพียงอย่างเดียว ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 367% และการเพิ่มประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 1.96 เมื่อติดตั้ง conical ring และ twisted-tape $Y=3.75$

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ชุดการทดลอง (รูปที่ 3.1) ประกอบด้วย

1. เครื่องเป่าอากาศ (1)
2. ท่อวงช้าง (2)
3. ท่อก่อนท่อส่วนทดลอง (ท่อพีวีซี) ยาว 2 เมตร (3)
4. ท่อส่วนทดลอง (ท่อทองแดง) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ยาว 1.5 เมตร (4)
5. ฮีตเตอร์ชนิดรีดท่อ จำนวน 8 ตัว กำลังไฟฟ้ารวม 3,200 วัตต์ (5)
6. วงจรหรีไฟ (6)
7. ปลั๊กพ่วง (7)

3.1.2 อุปกรณ์วัด (รูปที่ 3.1) ประกอบด้วย

1. เครื่องวัดความเร็วอากาศ (8)
2. เทอร์โมคัปเปิล (9)
3. เครื่องวัดความดันแบบหลอดรูปตัวยู (10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 แผ่นกั้น ประกอบด้วย

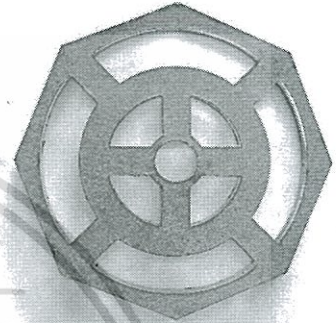
1. แผ่นกั้นโลหะ (รูปที่ 3.2)
2. แผ่นกั้นอะคริลิก (รูปที่ 3.3)
3. แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.2 แผ่นกั้นโลหะ



รูปที่ 3.3 แผ่นกั้นอะคริลิก



รูปที่ 3.4 แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การออกแบบแผ่นกั้น

ในการออกแบบแผ่นกั้นจะออกแบบให้สอดคล้องกับจุดประสงค์ของปริญญานิพนธ์ โดยแผ่นกั้นที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แผ่นกั้นโลหะ แผ่นกั้นอะคริลิก และแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม เพื่อใช้ศึกษาผลการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและความดันสลดที่เกิดขึ้นภายในท่อ

การออกแบบแผ่นกั้นโลหะ (รูปที่ 3.2) และแผ่นกั้นอะคริลิก (รูปที่ 3.3) ให้มีรูปทรงเหมือนกัน เนื่องจากใช้สำหรับศึกษาผลของวัสดุที่ใช้ทำแผ่นกั้นในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เพราะแผ่นกั้นโลหะจะเกิดการนำความร้อนระหว่างแผ่นกั้นและท่อทดลอง (ทองแดง) ในขณะที่แผ่นกั้นอะคริลิกจะเกิดผลของการนำความร้อนน้อย จึงสามารถนำมาสรุปได้ว่าการนำความร้อนระหว่างวัสดุมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนมากหรือน้อยเพียงใด

การออกแบบแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม (รูปที่ 3.4) เป็นการออกแบบให้แผ่นกั้นมีรูปทรงทางเรขาคณิตแบบเหลี่ยม เนื่องจากเมื่อใส่แผ่นกั้นที่มีรูปทรงแปดเหลี่ยมภายในท่อทรงกระบอกจะทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กระหว่างแผ่นกั้นและผนังท่อ ทำให้อากาศเกิดการไหลไปยังบริเวณผนังท่อมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดการทำลายขอบของชั้นความหนืดย่อยและชั้นปรับตัว (Edge of viscous sublayer and edge of transitional) ซึ่งเป็นชั้นขอบเขตทางความร้อน

(Thermal boundary layer) และสามารถนำผลการทดลองไปสรุปได้ว่าการลดชั้นขอบเขตทางความร้อนจะส่งผลมากหรือน้อยเพียงใดในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของแผ่นกั้นอะคริลิก

3.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

- 1.) ประกอบชุดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.1
- 2.) เปิดเครื่องเป่าอากาศให้อากาศไหลผ่านท่อพีวีซีและท่อส่วนทดลอง จากนั้นปรับอัตราการไหลของอากาศให้ได้ความเร็วที่ต้องการ โดยวัดความเร็วอากาศที่ขาออกจากท่อทองแดงด้วยเครื่องวัดความเร็วอากาศ
- 3.) ปรับกำลังไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์
- 4.) รอจนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุล แล้ววัดอุณหภูมิผิวท่อ ($T_{w1}, T_{w2}, \dots, T_{w7}$) อุณหภูมิอากาศขาเข้าท่อ (T_i) และอุณหภูมิอากาศขาออกท่อ (T_o)
- 5.) บันทึกผลการทดลองและนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในการทดลองจะปรับเปลี่ยนค่าดังต่อไปนี้
 - ปรับความเร็วอากาศให้ได้ $Re = 5,000 \quad 10,000 \quad 15,000 \quad 20,000$ และ $25,000$
 - เปลี่ยนแผ่นกั้น ได้แก่ แผ่นกั้นโลหะ แผ่นกั้นอะคริลิก และแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม
 - ปรับ $PR=1,2$ และ 3

2. การหาค่าตัวประกอบความเสียดทาน

- 1.) ประกอบชุดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.1
- 2.) เปิดเครื่องเป่าอากาศให้อากาศไหลผ่านท่อพีวีซีและท่อส่วนทดลอง จากนั้นปรับอัตราการไหลของอากาศด้วยวาล์วบายพาสให้ได้ความเร็วที่ต้องการ โดยวัดความเร็วอากาศที่ขาออกจากท่อทองแดงด้วยเครื่องวัดความเร็วอากาศ
- 3.) วัดความแตกต่างระดับน้ำในเครื่องวัดความดันแบบหลอดรูปตัวยู
- 4.) บันทึกผลการทดลองและนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาตัวประกอบความเสียดทาน

ในการทดลองจะปรับเปลี่ยนค่าดังต่อไปนี้

- ปรับความเร็วอากาศให้ได้ $Re = 5,000 \ 10,000 \ 15,000 \ 20,000$ และ $25,000$
- เปลี่ยนแผ่นกัน ได้แก่ แผ่นกันโลหะ แผ่นกันอะคริลิก และแผ่นกันอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม
- ปรับ $PR=1,2$ และ 3

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

1.) การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในเทอมของเลขนัสเซลต์

- หาความเร็วอากาศ (v) จากสมการ 2.1

$$Re = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{\rho v D_i}{\mu}$$

$$v = \frac{Re \mu}{\rho D_i}$$

- หาพื้นที่ผิวภายในท่อ (A_{w_i})

$$A_{w_i} = \pi D_i L$$

- หาพื้นที่หน้าตัดภายในท่อ (A_{c_i})

$$A_{c_i} = \pi \frac{D_i^2}{4}$$

- หาอุณหภูมิผิวท่อเฉลี่ย (T_s)

$$T_s = \frac{Tw_1 + Tw_2 + \dots + Tw_7}{7}$$

- หาอุณหภูมิอากาศภายในท่อเฉลี่ย (T_b)

$$T_b = \frac{T_i + T_o}{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หาอัตราการไหลของอากาศ

$$\dot{m} = \rho v A c_i$$

- หาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (\bar{h}) จากสมการ 2.18

$$\bar{h} = \frac{\dot{m} c_p (T_o - T_i)}{A_{wi} (T_s - T_b)}$$

- หาเลขนัสเซิลต์ (Nu)

$$Nu = \frac{\bar{h} D_i}{k}$$

- 2.) หาตัวประกอบความเสียดทาน จากสมการ 2.8

$$f = \Delta p \left(\frac{2}{\rho u_i^2} \right) \left(\frac{D_i}{L} \right)$$

เมื่อ Δp คือ ความดันลดตกคร่อมท่อส่วนทดลอง

- 3.) หาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน จากสมการ 2.22

$$TPF = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) / \left(\frac{f}{f_0} \right)^{\frac{1}{3}}$$

เมื่อ Nu คือ เลขนัสเซิลต์สำหรับการทดลองที่มีการติดตั้งแผ่นกัน

Nu_0 คือ เลขนัสเซิลต์สำหรับการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นกัน

f คือ ตัวประกอบความเสียดทานที่มีการติดตั้งแผ่นกัน

f_0 คือ ตัวประกอบความเสียดทานที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นกัน

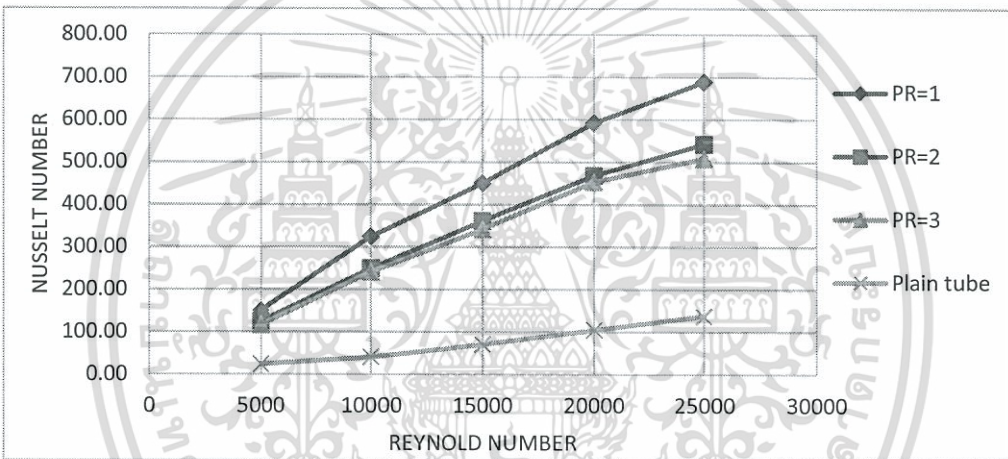
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

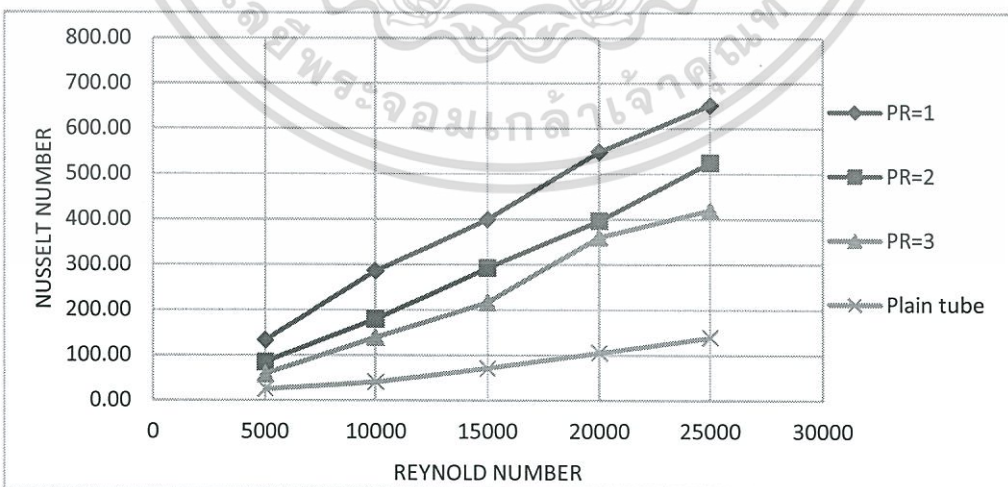
4.1 ผลการถ่ายเทความร้อนโดยการใส่แผ่นกัน

การทดลองใส่แผ่นกันเพื่อช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของอากาศในท่อ และจะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น ซึ่งแสดงด้วยเทอมของเลขนัสเซิลต์ โดยในการทดลองจะศึกษาผลของเลขเรย์โนลด์ ค่า PR และชนิดแผ่นกันที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนในเทอมของเลขนัสเซิลต์ ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3

4.1.1 การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากผลของเลขเรย์โนลด์และค่า PR

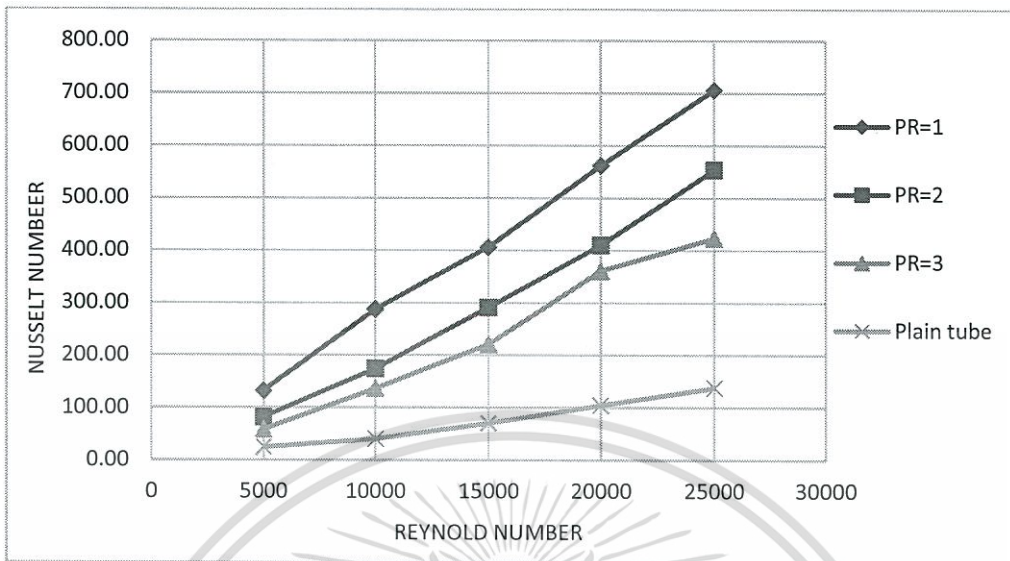


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์และเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกันโลหะที่ PR=1,2,3 กับท่อเปล่า



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์และเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกันอะคริลิกที่ PR=1,2,3 กับท่อเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลต์และเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม ที่ PR=1,2,3 กับท่อเปล่า

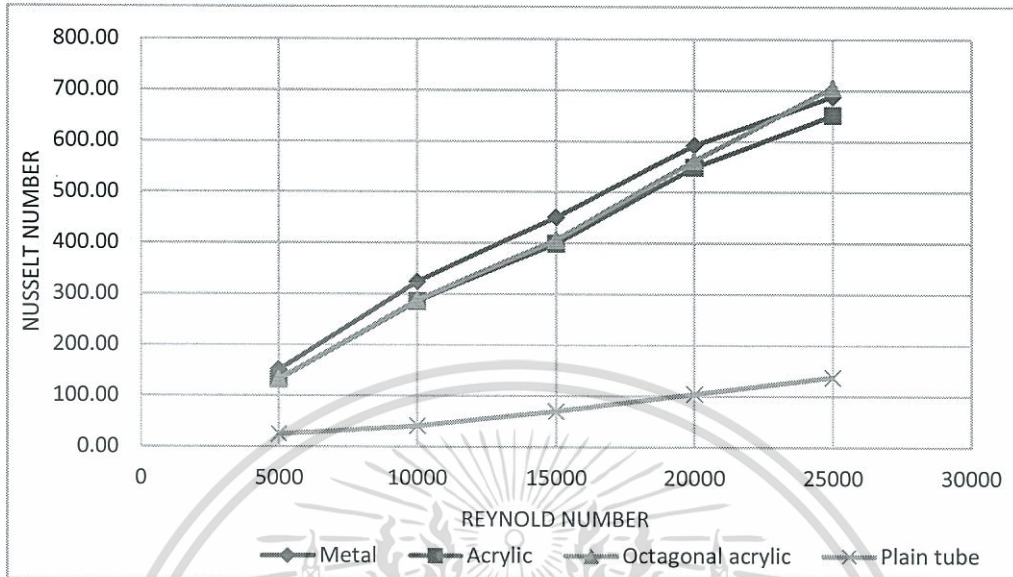
จาก รูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 พบว่าเลขนัสเซลต์จะขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลและค่า PR ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มที่ไปในทิศทางเดียวกัน คือ เลขนัสเซลต์จะลดลงเมื่อค่า PR มากขึ้น แต่เลขนัสเซลต์เพิ่มขึ้นตามเลขเรย์โนล และเลขนัสเซลต์ของการทดลองเมื่อใส่แผ่นกั้นจะมากกว่าท่อเปล่าเสมอ

เมื่อทดลองโดยการใส่แผ่นกั้นที่ PR ต่างกันภายในท่อ นำเลขนัสเซลต์ที่คำนวณได้จากผลการทดลองมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์กับเลขเรย์โนล พบว่า ที่ระยะ PR มากขึ้น (จำนวนแผ่นกั้นในท่อทดลองลดลงเพราะระยะห่างมากขึ้น) เลขนัสเซลต์จะมีค่าลดลง เนื่องจากความปั่นป่วนของอากาศในท่อที่เกิดจากแผ่นกั้นลดน้อยลง

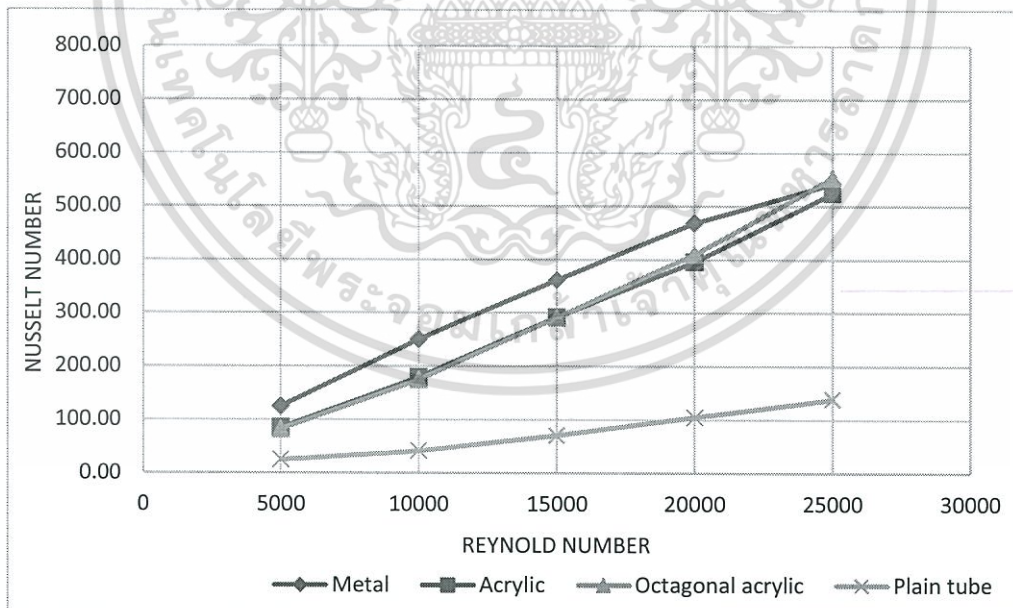
เมื่อทดลองที่ PR เดียวกันพบว่าเลขนัสเซลต์จะเพิ่มขึ้นตามเลขเรย์โนล เนื่องจากความปั่นป่วนของอากาศจะเกิดจากความเร็วกากาศที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งแสดงในเทอมของเลขเรย์โนล

ดังนั้นแผ่นกั้นที่มี PR น้อย เลขเรย์โนลสูง จะมีเลขนัสเซลต์สูง เนื่องจากความปั่นป่วนของอากาศเกิดจากการไหลของอากาศผ่านแผ่นกั้นจำนวนมาก อีกทั้งอากาศยังมีความปั่นป่วนสูงจากเลขเรย์โนล เลขนัสเซลต์สูงสุด คือ 706.27, 688.49 และ 651.40 ที่ PR=1, Re=25,000 ของแผ่นกั้นอะคริลิกแปดเหลี่ยม แผ่นกั้นโลหะ และแผ่นกั้นอะคริลิก ตามลำดับ

4.1.2 การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากผลของชนิดแผ่นกั้น

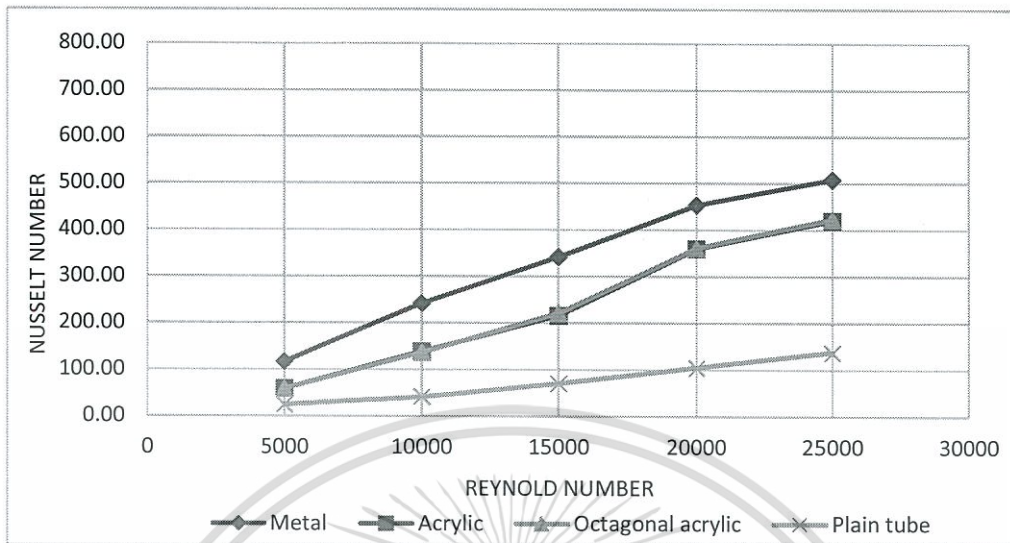


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลต์และเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นโลหะ แผ่นกั้นอะคริลิก และแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1 กับท่อเปล่า



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลต์และเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นโลหะ แผ่นกั้นอะคริลิก และแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=2 กับท่อเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลต์และเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นโลหะ แผ่นกั้นอะคริลิก และแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ $PR=3$ กับท่อเปล่า

จาก รูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าที่ค่า PR เท่ากัน เลขนัสเซลต์ของแผ่นกั้นแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน เนื่องจากแผ่นกั้นโลหะจะมีผลของการนำความร้อนระหว่างแผ่นกั้นกับท่อส่วนทดลอง และแผ่นกั้นอะคริลิกแปดเหลี่ยมจะมีผลของการลดชั้นขอบเขตทางความร้อนที่ผนังท่อด้านใน ส่วนแผ่นกั้นอะคริลิกจะมีผลของการนำความร้อนและการลดชั้นขอบเขตทางความร้อนน้อย

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างแผ่นกั้นโลหะและแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมพบว่าที่ $PR=1$ และ 2 แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมมีเลขนัสเซลต์สูงกว่าแผ่นกั้นโลหะเมื่อ $Re=25,000$ แสดงว่าที่เลขเรย์โนลด์สูงๆ การลดชั้นขอบเขตทางความร้อนส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่าการนำความร้อน แต่ที่ระยะ $PR=3$ ผลของการนำความร้อนของแผ่นกั้นโลหะมีมากกว่าการลดชั้นขอบเขตทางความร้อนของแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม เนื่องจากกระห่างระหว่างมากขึ้น ความปั่นป่วนของอากาศลดลงอย่างมาก การเกิดกระแสหมุนวน (Eddies current) น้อยลงและไม่สามารถเจาะผ่านชั้นขอบเขตทางความร้อนได้ ส่งผลให้การนำความร้อนจึงมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนมากกว่าการลดชั้นขอบเขตทางความร้อน

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมกับแผ่นกั้นอะคริลิกพบว่าที่ $PR=1$ และ 2 , $Re=5,000$ ถึง $25,000$ แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมมีเลขนัสเซลต์สูงกว่าแผ่นกั้นอะคริลิก แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นที่ $PR=3$ เลขนัสเซลต์ของแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม

จะมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นกั้นอะคริลิก แสดงว่าเมื่อไม่มีผลของการนำความร้อนเกิดขึ้น ผลจากการลดชั้นขอบเขตทางความร้อนสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้จริง

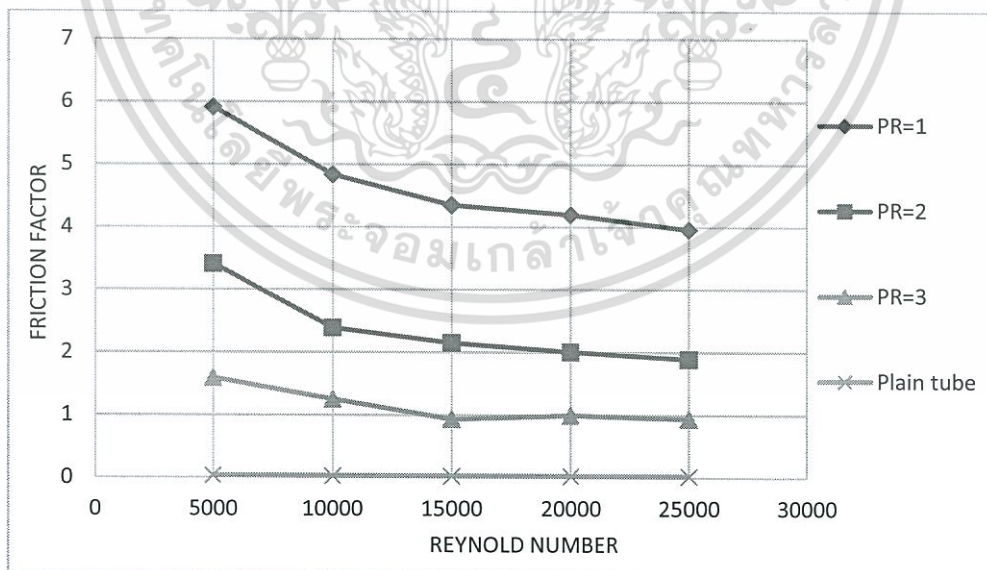
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างแผ่นกั้นโลหะและแผ่นกั้นอะคริลิก พบว่าที่ $PR=1,2$ และ 3 , $Re=5,000$ ถึง $25,000$ แผ่นกั้นโลหะมีเลขนีสเซิลต์สูงกว่าแผ่นกั้นอะคริลิกทุกสภาวะการทดลอง เป็นผลเนื่องจากแผ่นกั้นอะคริลิกเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างแผ่นกั้นและท่อน้อย อีกทั้งยังไม่เกิดการลดชั้นขอบเขตทางความร้อนอีกด้วย

จากการวิเคราะห์ดังกล่าวจึงบ่งบอกได้ว่า การลดชั้นขอบเขตทางความร้อนโดยใช้แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้และให้ผลที่สูงกว่าแผ่นกั้นโลหะเมื่อ PR น้อยๆ เลขเรย์โนลสูงๆ ($PR=1$ และ 2 , $Re=25,000$) และสูงกว่าแผ่นกั้นอะคริลิกเมื่อ PR น้อยๆ ($PR=1$ และ 2 , $Re=5,000$ ถึง $25,000$)

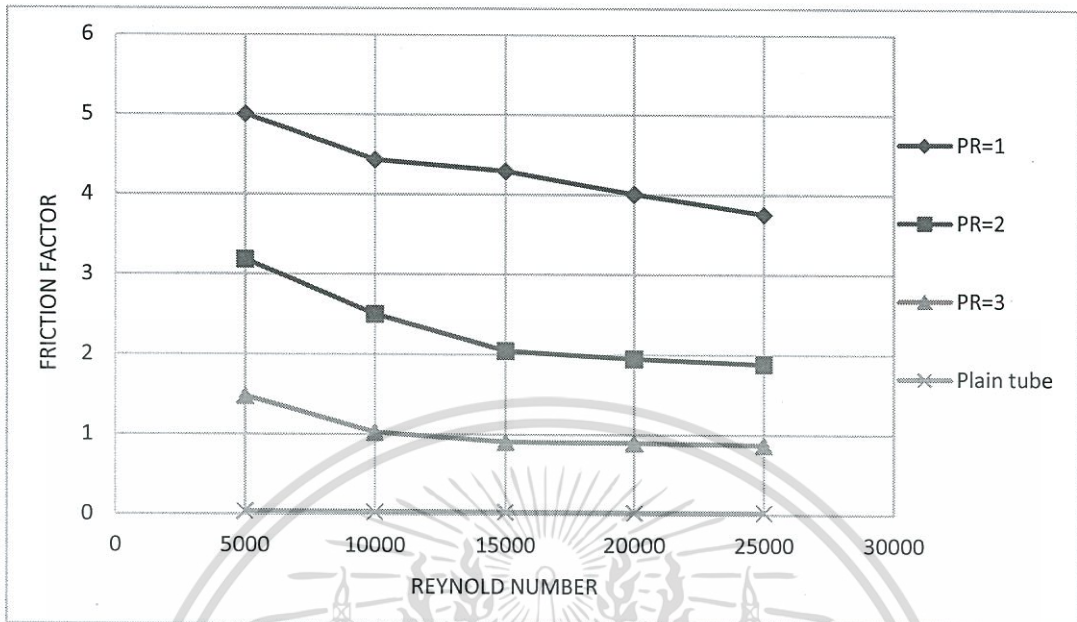
4.2 ผลของความดันลดที่เกิดขึ้นในท่อเมื่อใส่แผ่นกั้น

ในการทดลองมีการวัดค่าความดันลด เพื่อใช้คำนวณตัวประกอบความเสียดทาน โดยในการทดลองได้มีการศึกษาผลของ เลขเรย์โนล PR และรูปทรงของแผ่นกั้นที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน

4.2.1) ความดันลดเนื่องจากผลของเลขเรย์โนลและค่า PR



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นอะคริลิก ที่ $PR=1,2,3$ กับท่อเปล่า



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นอะคริลิก ทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1,2,3 กับท่อเปล่า

จาก รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงให้เห็นว่าตัวประกอบความเสียดทานของแผ่นกั้นทรงแปดเหลี่ยมและแผ่นกั้นทรงแปดเหลี่ยมมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานจะลดลงตามเลขเรย์โนลและค่า PR ที่เพิ่มขึ้น

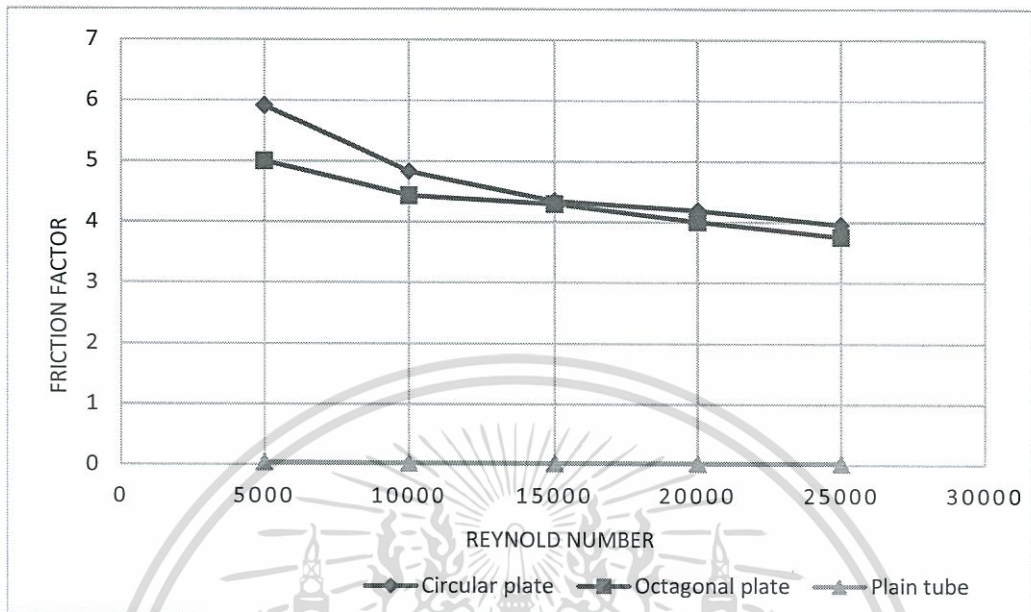
ตัวประกอบความเสียดทานลดลงเมื่อเลขเรย์โนลสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อความเร็วอากาศภายในท่อสูง ความเสียดทานในการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านแผ่นกั้นจะลดลง จากสมการ

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

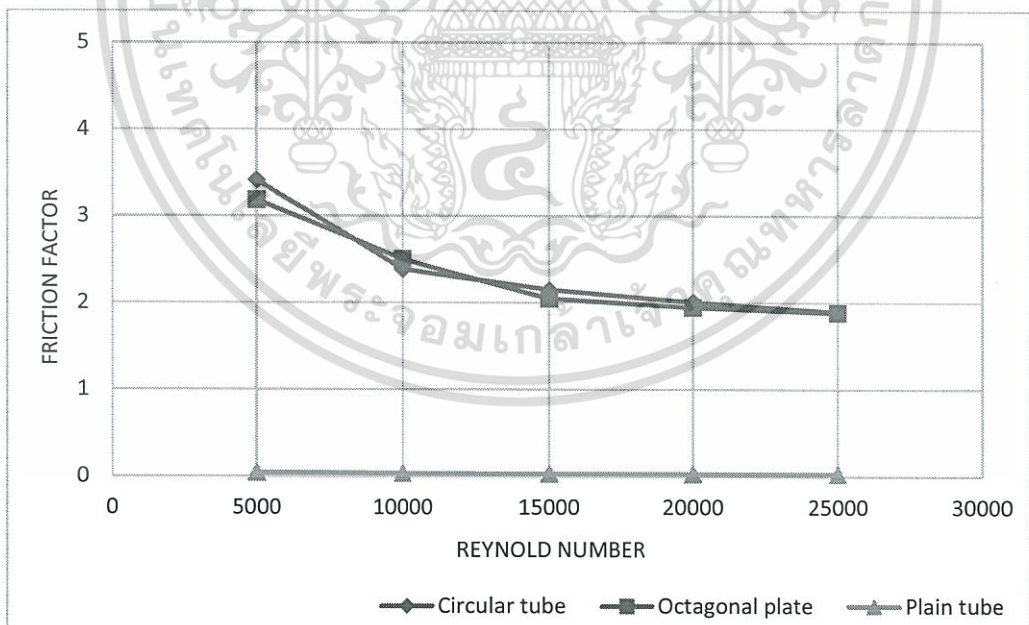
เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ความดันลดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้ตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลง เนื่องจากความเร็วที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อตัวประกอบความเสียดทานมากกว่าความดันลดที่เพิ่มขึ้น

เมื่อ PR มากขึ้น ตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าลดลง เพราะจำนวนแผ่นกั้นในท่อทดลองน้อยลง อากาศจึงเคลื่อนที่ผ่านท่อด้วยแรงเสียดทานที่น้อยลง

4.2.2) ความดันลดเนื่องจากผลของรูปทรงแผ่นกั้น

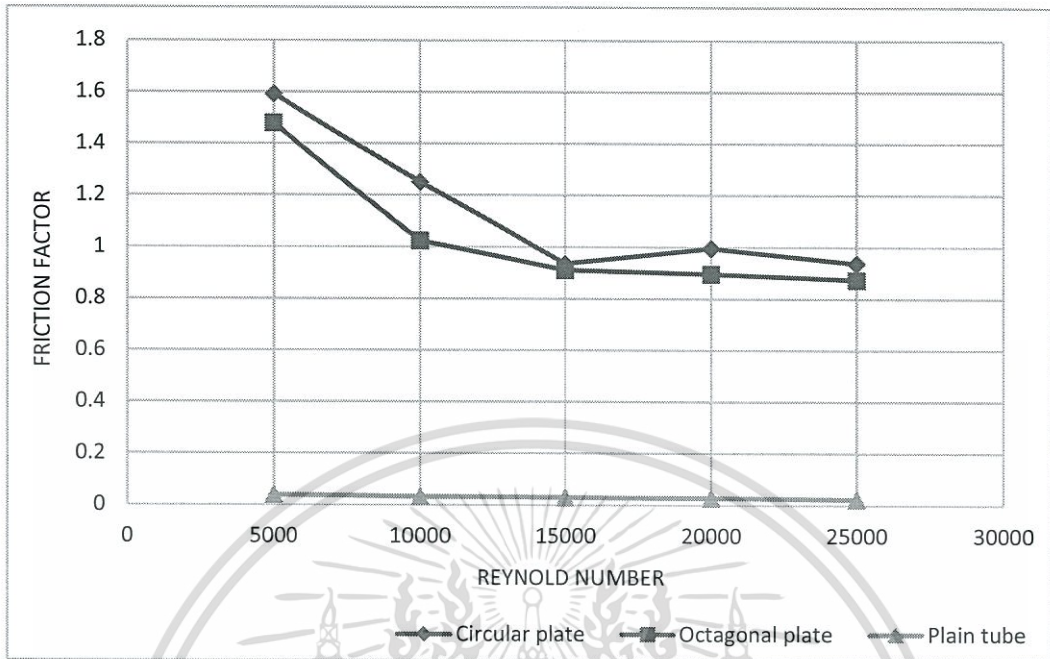


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นอะคริลิกกับแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1 กับท่อเปล่า



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นอะคริลิกกับแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=2 กับท่อเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



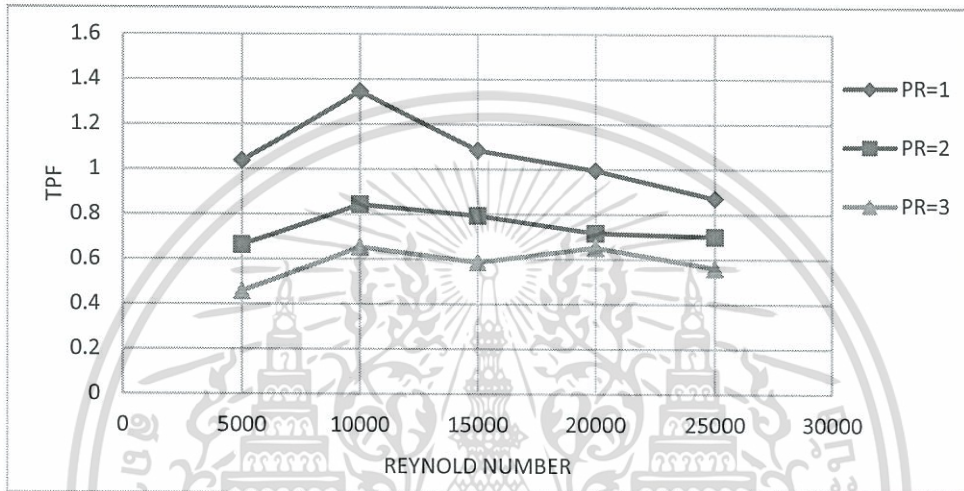
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นอะคริลิกกับแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=3 กับท่อเปล่า

เมื่อนำตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากแผ่นกั้นทรงแผ่นกลมและแผ่นกั้นทรงแปดเหลี่ยมมาเปรียบเทียบกัน พบว่า แผ่นกั้นทรงแปดเหลี่ยมมีตัวประกอบความเสียดทานน้อยกว่า เพราะมีพื้นที่ช่องเปิดของแผ่นกั้นมากกว่า ทำให้อากาศไหลผ่านแผ่นกั้นด้วยความเสียดทานที่น้อยลง โดยค่าตัวประกอบความเสียดทานต่ำสุด คือ แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม (0.87 ที่ PR=3, Re=25,000)

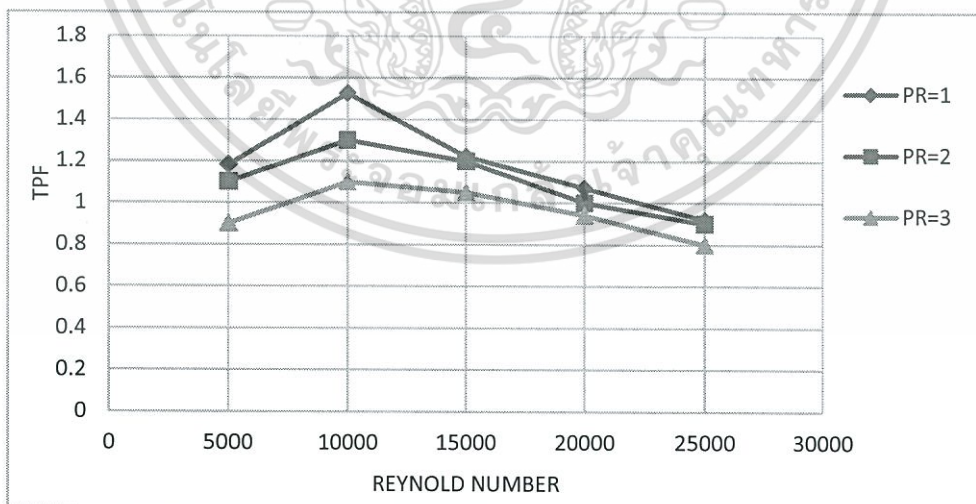
4.3 สมรรถนะเชิงความร้อน

การพิจารณาว่าการใส่แผ่นกั้นที่สภาวะใดมีความเหมาะสม คือ สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้สูง อีกทั้งเกิดความดันตกภายในท่อต่ำ โดยจะคิดเทียบกับการถ่ายเทความร้อนและความดันตกเมื่อไม่มีการใส่แผ่นกั้น ดังสมการ 2.22

4.3.1 สมรรถนะเชิงความร้อนเนื่องจากผลของเลขเรย์โนลด์และค่า PR

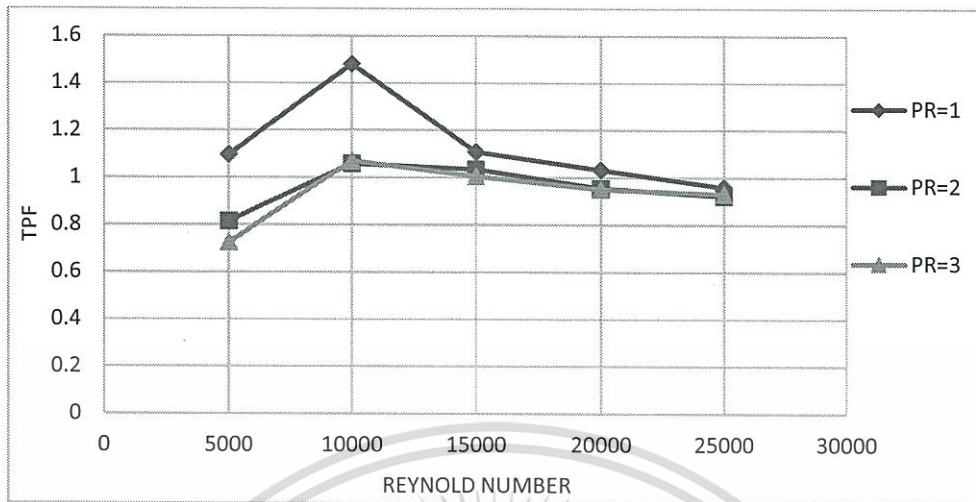


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นโลหะที่ PR=1,2,3



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลด์ของแผ่นกั้นอะคริลิกที่ PR=1,2 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นอะคริลิก ทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1,2 และ 3

จาก รูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่คล้ายกันของสมรรถนะเชิงความร้อน โดยในช่วง $Re=5,000$ ถึง $10,000$ สมรรถนะเชิงความร้อนมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎี (รูปที่ 2.4) คือ ช่วงเริ่มต้นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ($5,000 < Re < 8,000$) พบว่าเลขนัสเซิลต์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่ (Fully turbulent) ($Re \approx 8,000$) เลขนัสเซิลต์จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้าลง ประกอบกับค่าความดันตกที่ลดน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด (หัวข้อ 4.2) ทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สภาวะ $Re=10,000$ มีค่าสูงที่สุด และจากสมการ 2.22

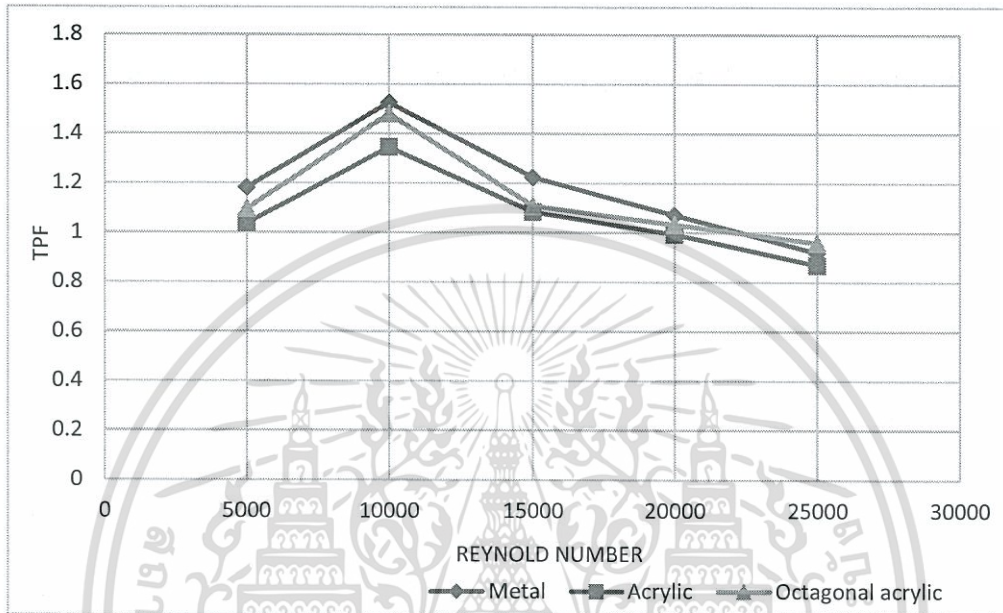
$$TPF = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) / \left(\frac{f}{f_0} \right)^{\frac{1}{3}}$$

ถ้าตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลง และเลขนัสเซิลต์มีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจึงสูงขึ้น จากสมการ 2.22 แสดงให้เห็นว่าเลขนัสเซิลต์มีอิทธิพลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่าตัวประกอบความเสียดทาน ดังนั้น ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจึงขึ้นอยู่กับผลการถ่ายเทความร้อนมากกว่าความดันตกที่เกิดขึ้น

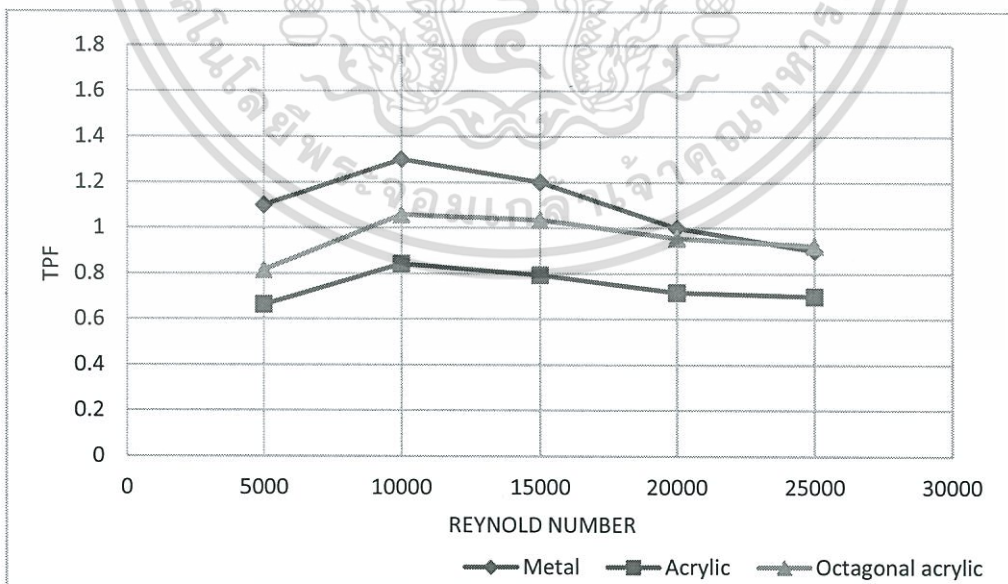
เมื่อ PR มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตัวประกอบความเสียดทานลดลงเพียงเล็กน้อย แต่เลขนัสเซิลต์ลดลงอย่างมาก ทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของแผ่นกั้นที่ PR สูงๆ มีค่าน้อยกว่า PR ต่ำๆ คือ

ที่ PR=1 ของแผ่นกั้นทุกชนิดจะมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด และที่ PR=3 จะมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนต่ำที่สุด

4.3.2 สมรรถนะเชิงความร้อนเนื่องจากผลของชนิดแผ่นกั้น

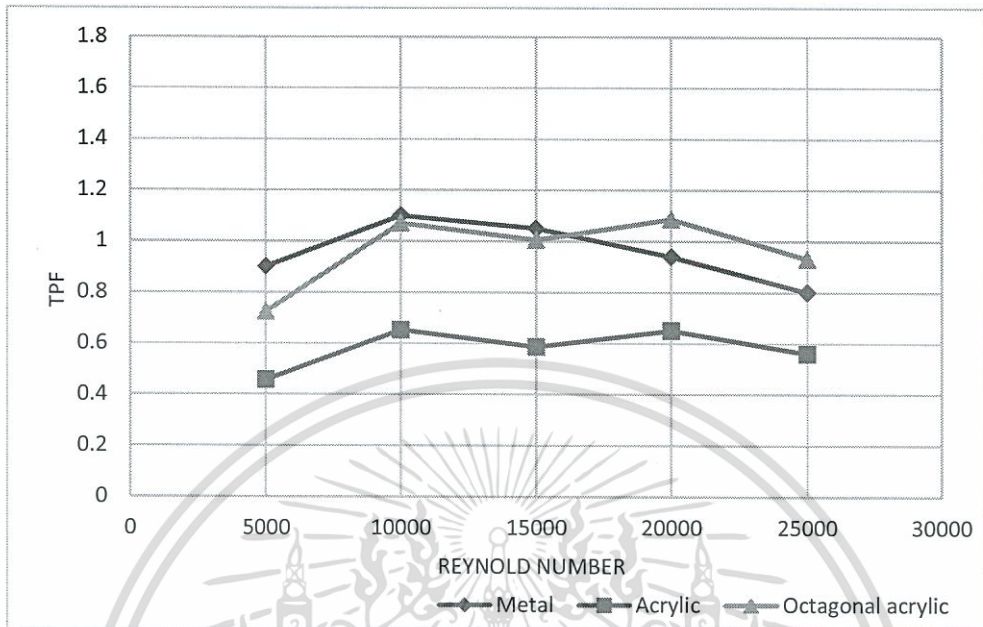


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นที่ PR=1



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นที่ PR=2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนและเลขเรย์โนลของแผ่นกั้นที่ PR=3

จาก รูปที่ 4.14 ที่สภาวะ PR=1, Re=5,000 ถึง 20,000 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของแผ่นกั้นโลหะมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมและค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมมีค่ามากกว่าแผ่นกั้นอะคริลิก แสดงว่าผลการลดขอบของชั้นความหนืดย่อยและขอบของชั้นปรับตัว (Edge of viscous sublayer and edge of transitional) ของแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมได้ผลจริง ที่ Re=25,000 พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมมีค่ามากกว่าแผ่นกั้นโลหะ แสดงว่า ที่เลขเรย์โนลสูงๆ ผลการนำความร้อนจะลดลง เนื่องจากกระแสหมุนวน (Eddies current) สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นความหนืดย่อยได้ ทำให้ชั้นดังกล่าวนี้บางลง การพาความร้อนจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในเทอมของเลขนัสเซิลต์สูงขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลของเลขเรย์โนลด์ที่ส่งผลต่อเลขนัสเซิลด์และตัวประกอบความเสียดทาน

- 1) เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น เลขนัสเซิลด์จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากความปั่นป่วนของอากาศเพิ่มขึ้นตามเลขเรย์โนลด์
- 2) เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ค่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลง โดยมีแนวโน้มที่ $Re=5,000$ ถึง $10,000$ จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน จากนั้นจะลดลงเพียงเล็กน้อยจนถึง $Re=25,000$

5.1.2 ผลของค่า PR ที่ส่งผลต่อเลขนัสเซิลด์และตัวประกอบความเสียดทาน

- 1) เมื่อ PR มากขึ้น เลขนัสเซิลด์จะมีค่าลดลง เนื่องจากความปั่นป่วนของอากาศลดลง
- 2) เมื่อ PR มากขึ้น ตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลง เนื่องจากความเสียดทานในกรไหลของอากาศผ่านแผ่นกันลดน้อยลง

5.1.3 ผลของชนิดแผ่นกันและรูปทรงแผ่นกันที่ส่งผลต่อเลขนัสเซิลด์และตัวประกอบความเสียดทาน

ตารางที่ 5.1 แสดงเลขนัสเซิลด์ของแผ่นกันแต่ละชนิดที่ $PR=1,2$ และ 3

PR	แผ่นกัน	เลขนัสเซิลด์ที่เลขเรย์โนลด์				
		5,000	10,000	15,000	20,000	25,000
1	โลหะ	150.64	323.88	450.31	592.16	688.49
	อะคริลิก	132.07	285.60	398.85	548.92	651.40
	อะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม	132.27	287.34	406.24	561.91	706.27
2	โลหะ	124.64	249.79	361.09	468.25	542.20
	อะคริลิก	84.51	178.84	291.82	395.83	524.36
	อะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม	84.70	180.74	297.30	409.56	558.73
3	โลหะ	116.38	241.51	341.52	453.14	508.45
	อะคริลิก	58.22	138.55	215.73	359.77	419.75
	อะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม	58.44	136.14	220.79	360.75	423.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงตัวประกอบความเสียหายของแผ่นกั้นแต่ละชนิดที่ PR=1,2 และ 3

PR	แผ่นกั้น	ตัวประกอบความเสียหายที่เลขเรย์โนล				
		5,000	10,000	15,000	20,000	25,000
1	ทรงแผ่นกลม	5.91	4.83	4.35	4.19	3.96
	ทรงแปดเหลี่ยม	5.00	4.44	4.30	4.01	3.76
2	ทรงแผ่นกลม	3.41	2.39	2.15	2.00	1.89
	ทรงแปดเหลี่ยม	3.18	2.50	2.05	1.95	1.88
3	ทรงแผ่นกลม	1.59	1.25	0.94	0.99	0.94
	ทรงแปดเหลี่ยม	1.48	1.02	0.91	0.90	0.87

5.1.4 เปรียบเทียบผลแผ่นกั้นโลหะและแผ่นกั้นอะคริลิก

- 1) แผ่นกั้นโลหะมีเลขนัสเซลล์ต์ที่สูงกว่าแผ่นกั้นอะคริลิกทุกสภาวะการทดลอง
- 2) แผ่นกั้นโลหะและแผ่นกั้นอะคริลิกมีตัวประกอบความเสียหายเท่ากัน เนื่องจากมีรูปทรงเหมือนกัน

5.1.5 เปรียบเทียบผลแผ่นกั้นโลหะและแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม

- 1) แผ่นกั้นโลหะมีเลขนัสเซลล์ต์สูงกว่าแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมทุกสภาวะการทดลอง ยกเว้น ที่ PR=1 และ 2, Re=25,000 พบว่าเลขนัสเซลล์ต์ของแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมมีค่ามากกว่าเลขนัสเซลล์ต์ของแผ่นกั้นโลหะ
- 2) เมื่อพิจารณาที่ PR เท่ากัน แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมมีค่าตัวประกอบความเสียหายน้อยกว่าแผ่นกั้นโลหะ เนื่องจากมีพื้นที่เปิดของแผ่นกั้นมากกว่า

5.1.6 เปรียบเทียบผลแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมและแผ่นกั้นอะคริลิก

1. ที่ PR=1 และ 2 แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมมีเลขนัสเซลล์ต์มากกว่าแผ่นกั้นอะคริลิกอย่างมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเลขเรย์โนลมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ ที่ PR=3 เลขนัสเซลล์ต์ของแผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมจะมีทั้งค่าที่มากกว่าและน้อยกว่าแผ่นกั้นอะคริลิก
2. ค่าตัวประกอบความเสียหายที่ PR เท่ากัน มีค่าใกล้เคียงกัน

5.1.7 เปรียบเทียบผลสมรรถนะเชิงความร้อน

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของแผ่นกั้นแต่ละชนิดที่ PR=1,2 และ 3

PR	แผ่นกั้น	สมรรถนะเชิงความร้อนที่เลขเรย์โนลด์				
		5,000	10,000	15,000	20,000	25,000
1	โลหะ	1.18	1.53	1.22	1.07	0.92
	อะคริลิก	1.04	1.34	1.08	0.99	0.87
	อะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม	1.10	1.48	1.11	1.03	0.96
2	โลหะ	1.10	1.30	1.20	1.00	0.90
	อะคริลิก	0.66	0.84	0.79	0.72	0.70
	อะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม	0.82	1.06	1.04	0.95	0.92
3	โลหะ	0.90	1.10	1.05	0.94	0.80
	อะคริลิก	0.46	0.65	0.59	0.65	0.56
	อะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม	0.72	1.07	1.00	0.95	0.93

1. ที่ PR=1,2 และ 3, Re=10,000 ของแผ่นกั้นทุกชนิดจะมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุด โดยในช่วง Re=5,000 ถึง 10,000 สมรรถนะเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเลขนีสเซิลต์จะเพิ่มด้วยอัตราที่เกือบจะคงที่ แต่ตัวประกอบความเสียหายลดลงอย่าง เอ็กโปเนนเชียล ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมาก หลังจากนั้นที่ Re=15,000 ถึง 25,000 ค่าจะลดด้วยอัตราที่ช้าลง เนื่องจากตัวประกอบความเสียหายลดลงเพียงเล็กน้อย
2. แผ่นกั้นโลหะมีค่าเฉลี่ยสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม และแผ่นกั้นอะคริลิก ตามลำดับ
3. สภาวะที่ PR=1, Re=10,000 จึงเป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการติดตั้งแผ่นกั้น เนื่องจากสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้สูง อีกทั้งยังเกิดตัวประกอบความเสียหายน้อย ดังนั้นพลังงานที่ต้องป้อนให้แก่เครื่องเป่าอากาศจึงน้อยลง ทำให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด เมื่อเทียบกับการดำเนินการที่สภาวะเลขเรย์โนลด์สูงๆ เพราะต้องใช้พลังงานจากเครื่องเป่าอากาศมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับแผ่นกั้นอะคริลิกควรทำการปิดช่องเปิดของแผ่นกั้น เพื่อบังคับให้อากาศเคลื่อนที่ไปยังบริเวณผนังท่อนมากยิ่งขึ้น อากาศเคลื่อนที่เร็วขึ้น ส่งผลให้ชั้นขอบของชั้นความหนืดย่อยและขอบของชั้นปรับตัวมีความหนาลดลง ทำให้การพาความร้อนสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. L. Bergman, addrienne s. lavine La, frank p. Incropera, and david p. Dewitt, *fundamental of heat and mass transfer*, Seventh ed. 2002.
- [2] F. Kreith, R. M.manglik, and mark s. Bohn, *principles of heat transfer*, Seventh ed. 2011.
- [3] G. F. Hewitt, G. L. Shires, and T. R. Bott, *Process heat transfer*. .
- [4] N. Virunsunthornkul, “Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in cylindrical tube with perforate plate inserts,” 2016.
- [5] P. Promvong, “heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts,” *energy Convers. mangement*, 2008.
- [6] P. Promvong and S. Eiamsa-ard, “heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted-tape insert,” *Int. Commun. heat mass Transf.*
- [7] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering*. Academic Press, 2009.
- [8] R. D. Blevins, *Applied Fluid Dynamics Handbook*. 1984.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก1 ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นโลหะที่ PR=1

Re	v	ρ	Awi	Aci	c_p	k	Tw1	Tw2	Tw3	Tw4	Tw5	Tw6	Tw7	To	Ti	Tw _{av}	Tb	h	Nu
5000	1.59	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	39.7	41.5	42.7	42.1	44.6	43.6	44.7	46.5	33.7	42.70	40.1	77.10	150.64
10000	3.17	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	40.6	41.1	44	43.5	46.8	45.6	46.5	48.4	34.3	44.01	41.35	165.77	323.88
15000	4.76	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	41.8	42	44.1	43.7	46.8	46	46.7	48.5	34.8	44.44	41.65	230.47	450.31
20000	6.35	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	40.8	41	41.8	42.4	44.9	45	46.4	46.5	35.2	43.19	40.85	303.07	592.16
25000	7.93	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	39.6	41	41.8	42.5	45.1	45.5	46.2	46.1	35.3	43.10	40.7	352.38	688.49

ตารางที่ ก2 ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นโลหะที่ PR=2

Re	v	ρ	Awi	Aci	c_p	k	Tw1	Tw2	Tw3	Tw4	Tw5	Tw6	Tw7	To	Ti	Tw _{av}	Tb	h	Nu
5000	1.59	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	38.6	38.9	40.8	40.6	42.2	41.6	41.3	43.6	31.7	40.57	37.65	63.79	124.64
10000	3.17	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	37.2	37.8	38.4	38.8	40.4	40.1	40.5	41.4	32.1	39.03	36.75	127.84	249.79
15000	4.76	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	38	38	39.8	39.5	41	41.2	41.9	42.2	32.9	39.91	37.55	184.81	361.09
20000	6.35	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	38	37.9	40	39.9	41.1	42	42.2	42.4	33	40.16	37.7	239.65	468.25
25000	7.93	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	38.6	40	40.5	41	41.9	42	42.3	43.1	33	40.90	38.05	277.51	542.20

ตารางที่ ก3 ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นโลหะที่ PR=3

Re	v	ρ	Awi	Aci	c_p	k	Tw1	Tw2	Tw3	Tw4	Tw5	Tw6	Tw7	To	Ti	Tw _{av}	Tb	h	Nu
5000	1.59	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	38.2	38.3	39	39	41.5	41	40	41.8	32.4	39.57	37.1	59.57	116.38
10000	3.17	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	38.2	38.7	39.1	39.2	40.6	40.2	40	41.5	33.1	39.43	37.3	123.61	241.51
15000	4.76	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	37.8	38.3	39.8	39.7	40.3	40.1	40.8	41.3	33.7	39.54	37.5	174.79	341.52
20000	6.35	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	39.6	39.6	41	41	41	41.3	41.4	42.7	34	40.70	38.35	231.92	453.14
25000	7.93	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	40.1	40.7	42	42	42.8	42.9	43	43.8	34.4	41.93	39.1	260.23	508.45

ตารางที่ ก4 ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นอะคริลิกที่ PR=1

Re	v	ρ	Awi	Aci	c_p	k	Tw1	Tw2	Tw3	Tw4	Tw5	Tw6	Tw7	To	Ti	Tw _{av}	Tb	h	Nu
5000	1.59	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	43.5	44	45.3	45.7	46.8	48	49.5	51.4	31.7	46.11	41.55	67.60	132.07
10000	3.17	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	37.2	37.7	39.8	39.8	40.9	42.5	43.1	43.2	32.5	40.14	37.85	146.17	285.60
15000	4.76	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	38.8	39.3	40.6	40.6	41.8	42.5	43.3	43.9	33.1	40.99	38.5	204.14	398.85
20000	6.35	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	40.7	41	42	43.2	45	44.5	45.4	46.3	34.8	43.11	40.55	280.94	548.92
25000	7.93	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	41.1	41.5	41.6	43.7	44.9	43	45.6	46	34.9	43.06	40.45	333.39	651.40

ตารางที่ ก5 ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นอะคริลิกที่ PR=2

Re	v	ρ	Awi	Aci	c_p	k	Tw1	Tw2	Tw3	Tw4	Tw5	Tw6	Tw7	To	Ti	Tw _{av}	Tb	h	Nu
5000	1.59	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	40	41.7	42.7	43	45.2	46.4	47.7	45.8	31.4	43.81	38.6	43.25	84.51
10000	3.17	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	42	42.6	43.9	44.9	46.4	47.7	48.8	47.6	32.3	45.19	39.95	91.53	178.84
15000	4.76	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	43.1	43.9	44.5	46	46.8	49.2	49.2	48.9	33.8	46.10	41.35	149.36	291.82
20000	6.35	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	43.9	44.3	45.2	47.5	49	49.6	50.5	50.1	34.6	47.14	42.35	202.59	395.83
25000	7.93	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	44.4	45.2	45.8	47.9	48.6	49.3	50	50.5	35.2	47.31	42.85	268.37	524.36

ตารางที่ ก6 ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นอะคริลิกที่ PR=3

Re	v	ρ	Awi	Aci	c_p	k	Tw1	Tw2	Tw3	Tw4	Tw5	Tw6	Tw7	To	Ti	Tw _{av}	Tb	h	Nu
5000	1.59	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	40	41.7	42.7	43	45.2	46.4	47.7	43.5	31.2	43.81	37.35	29.80	58.22
10000	3.17	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	40.4	42.6	43.1	44.5	45.3	46	46.6	44.8	32.3	44.07	38.55	70.91	138.55
15000	4.76	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	41.6	43.8	44.4	44.5	45.2	46.1	46.8	45.5	33.8	44.63	39.65	110.42	215.73
20000	6.35	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	42.3	43.1	45	45.3	46.2	47.5	48	47.5	34	45.34	40.75	184.14	359.77
25000	7.93	1.16	0.239	0.002	1005	0.026	43.3	44.2	45.8	46.1	47	47.8	48.9	48	34.4	46.16	41.2	214.83	419.75

ตารางที่ ก7 ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1

Re	v	ρ	Awi	Aci	c_p	k	Tw1	Tw2	Tw3	Tw4	Tw5	Tw6	Tw7	To	Ti	Tw _{av}	Tb	h	Nu
5000	1.59	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	38.2	39	39.8	40.2	41.5	43.3	45	44.6	31.2	41.00	37.9	67.70	132.27
10000	3.17	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	37.9	38.5	39	39.8	42	42.6	43.3	43.6	32.6	40.44	38.1	147.06	287.34
15000	4.76	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	38	39.4	40.5	41.1	42	43.3	44	44.2	33.2	41.19	38.7	207.92	406.24
20000	6.35	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	40.3	41.5	42.8	43.1	44	44.3	45.6	46.5	34.4	43.09	40.45	287.59	561.91
25000	7.93	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	41.4	42.2	43	43.9	44.5	45.3	45.9	47.2	35	43.74	41.1	361.48	706.27

ตารางที่ ก8 ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=2

Re	v	ρ	Awi	Aci	c_p	k	Tw1	Tw2	Tw3	Tw4	Tw5	Tw6	Tw7	To	Ti	Tw _{av}	Tb	h	Nu
5000	1.59	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	39.8	41.5	42.1	42.9	44.1	45.3	46.5	44.9	31.2	43.17	38.05	41.89	81.86
10000	3.17	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	40.2	41.6	43	43.8	44.5	45.3	46	45.4	32.5	43.49	38.95	89.08	174.06
15000	4.76	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	40.7	39.4	43.6	44.3	45	45.8	46.9	46	33.4	43.67	39.7	149.06	291.25
20000	6.35	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	41.5	42.7	43.1	44	44.9	45.7	46	46.5	34	43.99	40.25	209.62	409.56
25000	7.93	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	42.4	43.1	43.9	45	45.6	46.8	46.8	47.6	34.7	44.80	41.15	276.75	540.73

ตารางที่ ก9 ผลการทดลองในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เมื่อใช้แผ่นกั้นอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=3

Re	v	ρ	Awi	Aci	c_p	k	Tw1	Tw2	Tw3	Tw4	Tw5	Tw6	Tw7	To	Ti	Tw _{av}	Tb	h	Nu
5000	1.59	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	43.6	44.5	45.1	45.7	46.4	47.1	47.6	45.4	32.1	45.71	38.75	29.91	58.44
10000	3.17	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	43.9	44.3	44.7	45.1	46	46.8	47.2	46.1	32.8	45.43	39.45	69.68	136.14
15000	4.76	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	44	44.6	44.8	45.2	46.3	46.8	47.3	46.7	33.3	45.57	40	113.00	220.79
20000	6.35	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	43.8	44.2	45	45.7	46.1	46.8	47.7	47.8	34.2	45.61	41	184.64	360.75
25000	7.93	1.160	0.239	0.002	1005	0.026	44.2	44.9	45.6	46.1	46.9	47.5	48.3	48.1	34.5	46.21	41.3	216.71	423.41

ตารางที่ ก10 ผลการทดลองความดันลวดที่เกิดขึ้นภายในท่อในรูปตัวประกอบความเสียดทาน เมื่อใช้แผ่นกั้นทรงแผ่นกลมที่ PR=1

Re	v	Δh	ΔP	D_i	L	ρ	f
5000	1.59	2.6	255.0	0.0508	1.5	1.16	5.91
10000	3.17	8.5	833.6	0.0508	1.5	1.16	4.83
15000	4.76	17.2	1686.7	0.0508	1.5	1.16	4.35
20000	6.35	29.5	2893.0	0.0508	1.5	1.16	4.19
25000	7.93	43.5	4265.9	0.0508	1.5	1.16	3.96

ตารางที่ ก11 ผลการทดลองความดันลวดที่เกิดขึ้นภายในท่อในรูปตัวประกอบความเสียดทาน เมื่อใช้แผ่นกั้นทรงแผ่นกลมที่ PR=2

Re	v	Δh	ΔP	D_i	L	ρ	f
5000	1.59	1.5	147.1	0.0508	1.5	1.16	3.41
10000	3.17	4.2	411.9	0.0508	1.5	1.16	2.39
15000	4.76	8.5	833.6	0.0508	1.5	1.16	2.15
20000	6.35	14.1	1382.7	0.0508	1.5	1.16	2.00
25000	7.93	20.8	2039.8	0.0508	1.5	1.16	1.89

ตารางที่ ก12 ผลการทดลองความดันลวดที่เกิดขึ้นภายในท่อในรูปตัวประกอบความเสียดทาน เมื่อใช้แผ่นกั้นทรงแผ่นกลมที่ PR=3

Re	v	Δh	ΔP	D_i	L	ρ	f
5000	1.59	0.7	68.6	0.0508	1.5	1.16	1.59
10000	3.17	2.2	215.7	0.0508	1.5	1.16	1.25
15000	4.76	3.7	362.8	0.0508	1.5	1.16	0.94
20000	6.35	7	686.5	0.0508	1.5	1.16	1.00
25000	7.93	10.3	1010.1	0.0508	1.5	1.16	0.94

ตารางที่ ก13 ผลการทดลองความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อในรูปตัวประกอบความเสียดทาน เมื่อใช้แผ่นกั้นทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=1

Re	v	Δh	ΔP	D_i	L	ρ	f
5000	1.59	2.2	215.7	0.0508	1.5	1.16	5.00
10000	3.17	7.8	764.9	0.0508	1.5	1.16	4.44
15000	4.76	17	1667.1	0.0508	1.5	1.16	4.30
20000	6.35	28.2	2765.5	0.0508	1.5	1.16	4.01
25000	7.93	41.3	4050.1	0.0508	1.5	1.16	3.76

ตารางที่ ก14 ผลการทดลองความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อในรูปตัวประกอบความเสียดทาน เมื่อใช้แผ่นกั้นทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=2

Re	v	Δh	ΔP	D_i	L	ρ	f
5000	1.59	1.4	137.3	0.0508	1.5	1.16	3.18
10000	3.17	4.4	431.5	0.0508	1.5	1.16	2.50
15000	4.76	8.1	794.3	0.0508	1.5	1.16	2.05
20000	6.35	13.7	1343.5	0.0508	1.5	1.16	1.95
25000	7.93	20.7	2030.0	0.0508	1.5	1.16	1.88

ตารางที่ ก15 ผลการทดลองความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อในรูปตัวประกอบความเสียดทาน เมื่อใช้แผ่นกั้นทรงแปดเหลี่ยมที่ PR=3

Re	v	Δh	ΔP	D_i	L	ρ	f
5000	1.59	0.65	63.7	0.0508	1.5	1.16	1.48
10000	3.17	1.8	176.5	0.0508	1.5	1.16	1.02
15000	4.76	3.6	353.0	0.0508	1.5	1.16	0.91
20000	6.35	6.3	617.8	0.0508	1.5	1.16	0.90
25000	7.93	9.6	941.4	0.0508	1.5	1.16	0.87

ตารางที่ ก16 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศที่ความดันบรรยากาศมาตรฐาน (หน่วย SI)

(1) [8]

Temperature (°C)	Density, ρ (kg/m ³)	Dynamic viscosity, μ (N·s/m ²)	Kinematic viscosity, ν (m ² /s)	Specific heat ratio, γ
-40	1.514	1.57 E - 5	1.04 E - 5	1.401
-20	1.395	1.63 E - 5	1.17 E - 5	1.401
0	1.292	1.71 E - 5	1.32 E - 5	1.401
5	1.269	1.73 E - 5	1.36 E - 5	1.401
10	1.247	1.76 E - 5	1.41 E - 5	1.401
15	1.225	1.80 E - 5	1.47 E - 5	1.401
20	1.204	1.82 E - 5	1.51 E - 5	1.401
25	1.184	1.85 E - 5	1.56 E - 5	1.401
30	1.165	1.86 E - 5	1.60 E - 5	1.400
40	1.127	1.87 E - 5	1.66 E - 5	1.400
50	1.109	1.95 E - 5	1.76 E - 5	1.400
60	1.060	1.97 E - 5	1.86 E - 5	1.399
70	1.029	2.03 E - 5	1.97 E - 5	1.399
80	0.9996	2.07 E - 5	2.07 E - 5	1.399
90	0.9721	2.14 E - 5	2.20 E - 5	1.398
100	0.9461	2.17 E - 5	2.29 E - 5	1.397
200	0.7461	2.53 E - 5	3.39 E - 5	1.390
300	0.6159	2.98 E - 5	4.84 E - 5	1.379
400	0.5243	3.32 E - 5	6.34 E - 5	1.368
500	0.4565	3.64 E - 5	7.97 E - 5	1.357
1000	0.2772	5.04 E - 5	1.82 E - 4	1.321

* Based on data from R. D. Blevins, *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Van Nostrand Reinhold Co., Inc., New York, 1984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก17 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศที่ความดันบรรยากาศมาตรฐาน (หน่วย SI)
(2)

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg-°C)	μ (kg/m-s) $\times 10^{-5}$	ν (m ² /s) $\times 10^{-6}$	k (W/m-°C)	α (m ² /s) $\times 10^{-4}$	Pr
100	3.6010	1.0266	0.692	1.923	0.00925	0.0250	0.770
150	2.3675	1.0099	1.028	4.343	0.01374	0.0575	0.753
200	1.7684	1.0061	1.329	7.490	0.01809	0.1017	0.739
250	1.4128	1.0053	1.488	9.490	0.02227	0.1316	0.722
300	1.1774	1.0057	1.983	16.84	0.02624	0.2216	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	31.71	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.30	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06225	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702

Notes: T = temperature, ρ = density, c_p = specific heat capacity, μ = viscosity, $\nu = \mu/\rho$ = kinetic viscosity, k = thermal conductivity, $\alpha = c_p/k$ = heat (thermal) diffusivity, Pr = Prandtl number

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

การคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก ตารางที่ ก1 ทดลองโดยใช้แผ่นกั้นโลหะที่ระยะ PR=1, Re=5000

1.) การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

- หาความเร็วอากาศ (v)

จาก

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu}$$

$$v = \frac{Re \mu}{\rho D}$$

$$v = \frac{(5000)(1.87 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s})}{(1.16 \text{ kg/m}^3)(0.0508 \text{ m})}$$

$$v = 1.59 \text{ m/s}$$

- หาพื้นที่ผิวภายในท่อ (A_{w_i})

$$A_{w_i} = 2\pi \left(\frac{D_i}{2}\right) L$$

$$A_{w_i} = 2\pi \left(\frac{0.0508 \text{ m}}{2}\right) 1.5 \text{ m}$$

$$A_{w_i} = 0.239 \text{ m}^2$$

- หาพื้นที่หน้าตัดภายในท่อ (A_{c_i})

$$A_{c_i} = \pi \frac{D_i^2}{4}$$

$$A_{c_i} = \pi \frac{0.0508 \text{ m}^2}{4}$$

$$A_{c_i} = 0.002 \text{ m}^2$$

- หาอุณหภูมิผิวท่อเฉลี่ย (T_s)

$$T_s = \frac{Tw_1 + Tw_2 + \dots + Tw_7}{7}$$

$$T_s = \frac{39.7 + 41.5 + 42.7 + 42.1 + 44.6 + 43.6 + 44.7}{7}$$

$$T_s = 42.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หาอุณหภูมิอากาศภายในท่อเฉลี่ย (T_b)

$$T_b = \frac{T_i + T_o}{2}$$

$$T_b = \frac{33.7 + 46.5}{2}$$

$$T_b = 40.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- หาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h)

จากสมการที่ 2.16

$$h = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{A_{wi}(T_{w_{av}} - T_b)}$$

โดย

$$\dot{m} = \rho v A c_i$$

$$\dot{m} = \left(\frac{1.16 \text{ kg}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{1.59 \text{ m}}{\text{s}}\right) (0.002 \text{ m}^2)$$

$$\dot{m} = 0.003 \text{ kg/s}$$

ดังนั้น

$$h = \frac{\left(\frac{0.003 \text{ kg}}{\text{s}}\right) \left(\frac{1005 \text{ J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}\right) (46.5 - 33.7^\circ\text{C})}{0.239 \text{ m}^2 (42.7 - 40.1^\circ\text{C})}$$

$$h = 77.1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

- หาเลขนัสเซิลต์ (Nu)

$$Nu = \frac{hD_i}{k}$$

$$Nu = \frac{(77.1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})(0.0508 \text{ m})}{0.026 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{K}}$$

$$Nu = 150.64$$

2.) การหาตัวประกอบความเสียดทาน (f)

$$f = \Delta p \left(\frac{2}{\rho u_i^2}\right) \left(\frac{D_i}{L}\right)$$

$$f = (254.97 \text{ Pa}) \left(\frac{2}{(1.16 \text{ kg/m}^3)(1.59 \text{ m/s})^2}\right) \left(\frac{5.08 \times 10^{-2} \text{ m}}{1.5 \text{ m}}\right)$$

$$f = 5.91$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) การหาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (TPF)

$$TPF = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) / \left(\frac{f}{f_0} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$TPF = \left(\frac{154.64}{24.3} \right) / \left(\frac{5.91}{0.039} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$TPF = 1.18$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้