สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบและตัวสร้างกระแสวน

PERFORMANCE ENHANCEMENT OF A HEAT EXCHANGER WITH RIBS AND SWIRL GENERATORS

T 074456

ณรงค์ ทรัพย์พูศิริวงษ์

NARONG SUPPOOSIRIVONG

QW.
ว262ก
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....74456
วัน,เดือน,ปี.....- 1 ต.ค. 2550

.b.....11824463
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE ENHANCEMENT OF A HEAT EXCHANGER WITH RIBS AND SWIRL GENERATORS

NARONG SUPPOOSIRIVONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบและตัวสร้างกระแสวน
นักศึกษา	นายณรงค์ ทรัพย์พูศิริวงษ์
รหัสนักศึกษา	46060804
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ชินรักษ์ เธียรพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบและตัวสร้างกระแสวน โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวของท่อเป็นฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ในการทดลองโดยปรับใช้ความเร็วลมหลายๆ ค่าในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re = 3000 – 20000 ทำการเปรียบเทียบผลของท่อที่มีผนังเรียบโดยให้ลมไหลแบบตรง ท่อที่มีครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก และท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทาน จากการทดลองพบว่าชุดทดลองที่มีครีบและลมไหลแบบหมุนวนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างท่อที่มีครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก และท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว จะได้ว่าท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วให้ผลการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Performance Enhancement of a Heat Exchanger with Ribs and Swirl Generators
Student	Mr. Narong Suppoosirivong
Student ID.	46060804
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Chinaruk Thianpong
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

ABSTRACT

This research presents the study of performance enhancement in a rectangular duct using ribs and swirl generators. The experiments are made by varying air velocity for Reynolds numbers Re = 3000 – 20000 in the test section with a constant surface heat flux. Ribs mounted on the bottom and the top surfaces of the tested duct were placed in staggered or in-line arrangements. Swirl flow in the tested duct was produced by using twisted tape inserts in circular tubes placing across the duct upstream of the test section. The experimental result shows that the use of swirl flow generated by twisted tapes and the triangular ribs mounted on the bottom and the top of the duct leads to the highest heat transfer rate and friction factor in comparison with the duct without ribs and swirl flow.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบและตัวสร้างกระแสวน สำเร็จลุล่วงไปได้โดยความอนุเคราะห์สนับสนุนจาก ผศ.ดร.ชินรักษ์ เธียรพงษ์ และรศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่านได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์มณฑา เทียมเมือง ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและอำนวยความสะดวกในการทดลองอย่างดีเสมอมา นอกจากนั้นงานวิจัยเรื่องนี้ยังได้รับคำแนะนำอย่างดียิ่งจากคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างสูงที่ทำให้งานวิจัยเรื่องนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆน้องๆ ผู้ร่วมงานจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี

ผู้ที่ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนและทำวิจัยของผู้วิจัยมาโดยตลอด ได้แก่คุณพ่อ และคุณแม่ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณในทุกประการที่ให้แก่งานวิจัยเรื่องนี้ไว้ ณ โอกาสนี้

ณรงค์ ทรัพย์พูศิริวงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VIII

สารบัญรูป.....IX

รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....XVII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....1

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....2

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....2

1.5 โครงร่างวิทยานิพนธ์.....2

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....4

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

บทที่ 3 เงื่อนไขในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....13

3.1 เงื่อนไขในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....13

3.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล.....13

3.1.2 เงื่อนไขของการเดินเครื่อง.....13

3.1.3 คุณสมบัติทางเคมีของของไหล.....14

3.2 ความเหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....14

บทที่ 4 การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....18

4.1 การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....18

4.1.1 การแบ่งประเภทตามสภาวะของของไหลที่ใช้.....18

4.1.2 การแบ่งประเภทตามจุดประสงค์ของการใช้งาน.....19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.3 การแบ่งประเภทตามโครงสร้างของอุปกรณ์.....20
4.1.4 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตาม
Flow Arrangement.....29
4.1.5 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตาม
Transfer Process.....30
4.1.6 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตาม
Compactness.....31

บทที่ 5 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....32
5.1 วัสดุที่ใช้ในการทำ Heat Exchanger.....32
5.1.1 พลาสติก.....32
5.1.2 แกรไฟต์.....32
5.1.3 แก้ว.....34

บทที่ 6 ทฤษฎี.....36
6.1 กลศาสตร์ของไหล.....36
6.1.1 สภาวะการไหล.....36
6.1.2 ความเร็วเฉลี่ย.....37
6.1.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว.....38
6.1.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหล
แบบปรับตัวเต็มที่แล้ว.....40
6.2 การถ่ายเทความร้อน.....41
6.2.1 อุณหภูมิเฉลี่ย.....42
6.2.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้ว.....43
6.3 การสมดุลของพลังงาน.....44
6.4 สหพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม.....45
6.4.1 ช่วงบริเวณที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว.....45
6.5 สหพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบเทอร์บูเลนท์ในท่อกลม.....47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.6 สหพันธ์การพาความร้อน ท่อที่ไม่กลม.....48
6.7 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน.....49
6.8 ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน.....50

บทที่ 7 การออกแบบและการคำนวณ.....52
7.1 การออกแบบอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....52
7.2 การคำนวณ.....53
7.2.1 พัดลม.....53
7.2.2 ท่อทางเข้าชุดทดลอง.....54

บทที่ 8 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....55
8.1 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง.....55
8.1.1 ชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....55
8.1.2 Supply Air.....56
8.1.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ.....57
8.1.4 ถังพักลม.....58
8.1.5 อุปกรณ์ควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์.....58
8.1.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....59
8.1.7 อุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม.....60
8.1.8 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ.....61
8.2 อุปกรณ์การทดลอง.....61
8.3 วิธีการทดลอง.....62

บทที่ 9 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....64
9.1 ผลการทดลองท่อมีผนังเรียบ.....64
9.1.1 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number).....64
9.1.2 ค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor).....65
9.2 อิทธิพลรูปร่างครีบ.....65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

9.3 อิทธิพลความสูงครีบต่อระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลอง ที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว.....70
9.4 อิทธิพลมุมปะทะ.....75
9.5 อิทธิพลการจัดวางครีบ.....80
9.6 อิทธิพลลมไหลแบบหมุนวน.....85
9.7 ความสัมพันธ์ตัวเลขนัสเซิลท์.....89
9.8 ความสัมพันธ์ตัวประกอบเสียดทาน.....93

บทที่ 10 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....99
10.1 สรุปผลการทดลอง.....99
10.2 ข้อเสนอแนะ.....100

บรรณานุกรม.....101

ภาคผนวก.....103
ภาคผนวก ก.....104
ภาคผนวก ข.....108
ภาคผนวก ค.....112

ประวัติผู้เขียน.....121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างของเหลวใช้งานกับอุณหภูมิ.....27

4.2 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ สำหรับกรณีของก๊าซร้อนและก๊าซเย็น.....28

6.1 ค่า Nu_D สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อพื้นที่หน้าตัดต่างๆ กัน.....49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Carl-Olof Olsson and Bengt Sunden 6

2.2 Rib configurations: (a) cross rib-roughened (b) parallel rib-roughened (c) cross V-rib-roughened (d) parallel V-rib-roughened (e) Swirl Flow Tube 6

2.3 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Ahn, S.W. 7

2.4 รูปแบบครีบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Ahn, S.W. 7

2.5 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Rajendra Karwa 8

2.6 รูปแบบครีบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Rajendra Karwa 8

2.7 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Giovanni Tanda 9

2.8 รูปแบบครีบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Giovanni Tanda 9

2.9 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Jaurker, A.R., J.S. Saini, and B.K. Gandhi 10

2.10 รูปแบบครีบที่มีร่อง (Rib-grooved) ของ Jaurker, A.R., J.S. Saini, and B.K. Gandhi 11

2.11 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Benlu and Pei-Xue Jiang 12

2.12 รูปแบบครีบของ Benlu and Pei-Xue Jiang 12

4.1 ลักษณะการไหลในท่อสองชั้น (a) parallel flow (b) counter flow.....21

4.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น.....22

4.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน shell and tube แบบ (a) one shell pass และ one tube pass (b) parallel flow (c) counterflow.....23

4.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อหมุนวน.....23

4.5 ลักษณะการทำงานของฮีทไปป์.....27

4.6 โครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์.....27

4.7 (a) การไหลขนานกัน (b) การไหลสวนทางกัน (c) การไหลตัดขวางกัน.....29

4.8 การไหลแบบ Multipass (a) one shell pass, two tube pass (b) two shell pass, four tube pass (c) three shell pass, six tube pass.....30

4.9 แสดง Cooling Towers แบบ Natural Convection.....30

4.10 แสดง Cooling Towers แบบ Forced Convection.....31

5.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเชลล์ที่สร้างโดยใช้เทคนิครูไขว้.....33

5.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสี่เหลี่ยมที่ทำด้วยแกรไฟต์โดยใช้เทคนิครูไขว้.....33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเชลล์ที่ทำด้วยแก้วโดยมีเทฟลอนเป็นแผ่นยึดท่อ และซีล.....34

5.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแก้ว.....34

6.1 การก่อตัวของบาวน์ดารีเลเยอร์ของการไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม.....36

6.2 สมดุลแรงบนอิลิเมนท์ dx สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ก่อตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม.....38

6.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม.....41

6.4 การก่อตัวของบาวน์ดารีทางความร้อนในท่อกลม.....42

6.5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ.....44

6.6 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการติดแผ่นเกลียวบิด.....49

7.1 ชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและตัวสร้างกระแสวน.....53

8.1 ชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....55

8.2 Blower.....56

8.3 Motor.....56

8.4 Inverter.....57

8.5 Orifice meter.....57

8.6 Inclined manometer.....58

8.7 ถังพักลม.....58

8.8 เครื่องควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์.....59

8.9 Data Logger FLUKE 2680A.....59

8.10 คอมพิวเตอร์.....59

8.11 Thermocouple.....60

8.12 เครื่องวัดความดันตกคร่อม TESTO 350-M/XL.....60

8.13 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ TESTO 445.....61

8.14 ชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและตัวสร้างกระแสวน.....62

9.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีผนังเรียบ.....64

9.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีผนังเรียบ.....65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

9.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....66
9.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....66
9.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....67
9.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....68
9.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....69
9.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....70
9.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....71
9.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....71
9.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

9.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....73
9.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....74
9.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....75
9.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....76
9.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....76
9.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....77
9.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....78
9.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....78
9.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

9.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....80

9.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....81

9.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....82

9.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....82

9.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....83

9.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....84

9.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องโดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน.....85

9.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องโดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน.....86

9.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน.....87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

9.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน.....88

9.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน.....88

9.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน.....89

9.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน.....90

9.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu / \mathrm{Re}^{1.0759}$ กับ e/D กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน.....90

9.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากความสัมพันธ์กับค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากการทดลอง กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน.....91

9.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง.....92

9.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu / \mathrm{Re}^{1.0868}$ กับ e/D กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง.....92

9.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากความสัมพันธ์กับค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากการทดลอง กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง.....93

9.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน.....94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

9.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f/\mathrm{Re}^{-0.1372}$ กับ e/D กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว มีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน.....94

9.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทานจากความสัมพันธ์กับค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลอง กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน.....95

9.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง.....96

9.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f/\mathrm{Re}^{-0.1235}$ กับ e/D กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว มีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง.....97

9.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทานจากความสัมพันธ์กับค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลอง กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง.....97

ก-1 แสดงครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความหนา 6 มิลลิเมตร แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....105

ก-2 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้พื้นผิวครีบด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสกับทิศทางการไหลของลม.....105

ก-3 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้พื้นผิวครีบด้านมุมฉากสัมผัสกับทิศทางการไหลของลม.....106

ก-4 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....106

ก-5 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 มิลลิเมตร แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....106

ก-6 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 8 มิลลิเมตร แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....107

ก-7 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 และ 4 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับตลอดความกว้างครีบ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ก-8 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 และ 6 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ ตลอดความกว้างครีบ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง.....107

ข-1 Standard orifice plate.....109

ข-2 แสดงโครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิส.....109

ข-3 แสดงการไหลผ่านแผ่นออริฟิส (Orifice).....110

ข-4 ออริฟิสแบบต่างๆ.....110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_c พื้นที่หน้าตัด, m^2

A_s พื้นที่ผิว, m^2

C_f สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

C_1 ค่าคงที่

C_2 ค่าคงที่

c_p ความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่, $J/kg \cdot K$

c_v ความร้อนจำเพาะของของไหลที่ปริมาตรคงที่, $J/kg \cdot K$

D เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m

D_h เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค (Hydraulic diameter), m

e ความหยาบของผิว, m

f ตัวประกอบเสียดทาน

f_o ตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ

g ระยะร่อง, m

h สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, $W/m^2 \cdot K$

k ค่าการนำความร้อน, $W/m \cdot K$

L ความยาวท่อ, m

$\dot{m}$ อัตราการไหลของของไหล, kg/s

Nu_D นัสเซิลล์นัมเบอร์

Nu_o นัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบ

n ค่าคงที่

η ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

P เส้นรอบรูป, m

Pr พลานท์นัมเบอร์

p ระยะพิตต์

Δp ความดันลดของของไหล, N/m^2

Q อัตราการไหลของของไหล, m^3/s

q_{conv} อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด, W

q_s'' ฟลักซ์ความร้อนที่ผิว, W/m^2

R ค่าคงที่ของก๊าซ, $J/kg \cdot K$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

Re_D	เรย์โนลด์นัมเบอร์
r	รัศมีที่ตำแหน่งใดๆ, m
r_o	รัศมีท่อกลม, m
St	สแตนตันนัมเบอร์
T	อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ, ^oC
T_b	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, ^oC
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ, ^oC
$T_{m,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางเข้า, ^oC
$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางออก, ^oC
T_s	อุณหภูมิเฉลี่ยผิวครีบ, ^oC
u	ความเร็วตามแนวแกน x, m/s
u_m	ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ, m/s
$\overline{V}$	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s
v	ความเร็วตามแนวแกน r, m/s
$\dot{W}_{in}$	การจ่ายกำลังให้พัดลม, J/s
x	ความยาวที่ตำแหน่งใดๆ, m
x_{fd}	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัวเต็มที่, m
$x_{fd,h}$	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัว, m
x_{fdt}	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัวเต็มที่ของความร้อน, m
α	ค่าการฟุ้งกระจายความร้อน, m^2/s
ρ	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
μ	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล, $N \cdot s/m^2$
μ_s	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหลที่ผิว, $N \cdot s/m^2$
ν	ปริมาตรจำเพาะ, m^2/s
τ_r	ความเค้นเฉือนในแนวรัศมี, N/m^2
τ_s	ความเค้นเฉือนบนผิว, N/m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าความต้องการพลังงานมีมากขึ้น เนื่องจากโลกมีความเจริญมากขึ้น ทำให้มีการใช้พลังงานในปริมาณมากขึ้น จะเห็นได้ว่าวงการอุตสาหกรรม ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์แบบหนึ่งที่สำคัญพบได้บ่อยๆ ในทางวิศวกรรม หม้อน้ำ คอนเดนเซอร์ อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่น้ำ หม้อน้ำรถยนต์ คอยล์ร้อน หรือคอยล์เย็น ฯลฯ ต่างเป็นตัวอย่างของกระบวนการที่ซึ่งความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น อุตสาหกรรมปิโตรเคมีสมัยใหม่ โรงงานผลิตพลังงาน ฯลฯ ต่างมีกระบวนการมากมายจนไม่สามารถนับได้ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหล 2 ชนิดโดยไม่มีการผสมกันทางกายภาพเลย หลายประเทศพยายามที่จะหาวิธีเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อให้มากที่สุด ดังนั้นการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบและตัวสร้างกระแสวนจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ที่ผ่านมาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อโดยการทำให้พื้นที่ผิวขรุขระหรือติดครีบที่ผิวภายในท่อเพื่อให้เกิดเทอร์บูเลนท์ ช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ปัญหาของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ ต้องการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น จากปัญหาดังกล่าว ถ้าเราสามารถหาวิธีเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น เป็นผลให้เพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หลักการเดิมเป็นการติดครีบที่ผิวภายในท่อเป็นวิธีการในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ในขณะที่หลักการใหม่พบว่าผลของท่อที่มีครีบรวมทั้งลมไหลแบบหมุนวนภายในท่อโดยใช้แผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 360° ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบและตัวสร้างกระแสวนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อการค้นคว้าวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1.1.1 ศึกษาและออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและตัวสร้างกระแสวน

1.1.2 ศึกษาผลของลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวนภายในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.3 ศึกษาผลของรูปร่างครีบและตำแหน่งครีบ โดยติดครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาและออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและตัวสร้างกระแสวน โดยใช้แผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 360°

1.2.2 ทดลองที่สภาวะผิวของท่อเป็นฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่

1.2.3 ครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความหนา 6 มิลลิเมตร, ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสลม และด้านมุมฉากสัมผัสลม, ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 และ 4 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับตลอดความกว้างครีบ และ 4 และ 6 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับตลอดความกว้างครีบ ครีบทุกแบบมีความกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างแต่ละครีบ 2 เซนติเมตร และมีระยะพิตต์ 4 เซนติเมตร ครีบถูกติดกับผิวท่อแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

1.2.4 ระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองเท่ากับ 3.2 เซนติเมตร

1.2.5 ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทาน ในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re = 3000 – 20000

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.3.1 เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ

1.3.2 พัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น

1.3.3 สามารถนำหลักการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่างๆ

1.5 โครงร่างวิทยานิพนธ์

1.4.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการไหลของลม และผลของรูปร่างครีบและตำแหน่งครีบ

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีกลศาสตร์ของไหลและทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

1.4.3 ออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและตัวสร้างกระแสวน

1.4.4 ทำการทดลองเพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.5 เก็บผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.4.6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
วรรณกรรมปริทรรศน์

กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหลแตกต่างกัน 2 ชนิด เป็นสิ่งที่สำคัญมากและกระบวนการดังกล่าวพบได้บ่อยๆ ในทางวิศวกรรม หม้อน้ำ คอนเดนเซอร์ อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่น้ำ หม้อน้ำรถยนต์ คอยล์ร้อน หรือคอยล์เย็น ฯลฯ ต่างเป็นตัวอย่างของกระบวนการที่ซึ่งความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น อุตสาหกรรมปิโตรเคมีสมัยใหม่ โรงงานผลิตพลังงาน ฯลฯ ต่างมีกระบวนการมากมายจนไม่สามารถนับได้ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหล 2 ชนิดโดยไม่มีการผสมกันทางกายภาพเลย โดยทั่วไปอุปกรณ์นั้นเรียกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนธรรมดาอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด โดยขึ้นอยู่กับการจัดวางทิศทางสัมพัทธ์ของทิศทางการไหลของกระแสของไหลทั้ง 2 ชนิด ถ้ากระแสทั้งสองไหลตัดซึ่งกันและกันในช่องว่างที่โดยปกติเป็นมุมฉาก เครื่องแลกเปลี่ยนนี้ถูกเรียกว่าเป็น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกันหรือตั้งฉากกัน (Cross-flow heat exchanger) ตัวอย่างของเครื่องแบบนี้เช่น หม้อน้ำรถยนต์ หรือหน่วยหล่อเย็นในท่อระบบปรับอากาศ ชนิดที่สองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยเครื่องที่ซึ่งกระแสการไหล 2 ชนิดเคลื่อนที่ในทิศทางขนานกันในช่องว่าง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell-and-tube เป็นรูปแบบที่พบมากที่สุด และเครื่องแลกเปลี่ยนแบบท่อซ้อนกัน (เครื่องแลกเปลี่ยนแบบท่อสองชั้น) ก็เป็นตัวอย่างหนึ่งของเครื่องชนิดนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Han, J.C., L.R. Glicksman, and W.M. Rohsenow (1978) ทำการศึกษาผลของรูปร่างครีบ, มุมครีบ และอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูง มีผลต่อตัวประกอบเสียดทาน และการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีครีบถูกติดบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $\mathrm{Re} = 3000 - 30000$ พบว่าการจัดครีบแบบสมมาตรมีผลเหมือนกับการจัดครีบแนวเยื้อง, และรูปร่างของครีบมีผลอย่างมากต่อตัวประกอบเสียดทาน และมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนไม่มากนัก จากการทดลองพบว่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเมื่อครีบมีมุม 45°

Metzger, D.E., C.S. Fan, and Y. Yu (1990) ทำการศึกษาผลของมุมครีบและตำแหน่งครีบ มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับตำแหน่งของครีบ แบบแรกครีบถูกติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม และอีกแบบครีบถูกติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม พบว่าครีบมุม 60° ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Han, J.C., Y.M. Zhang, and C.P. Lee (1991) ทำการศึกษาผลของรูปร่างครีบรูปตัววีมุม 45° และครีบรูปตัววีมุม 60° แบบแรกแนวครีบรูปตัววีมุม 45° และแนวครีบรูปตัววีมุม 60° มีทิศทางเดียวกับการไหล และอีกแบบแนวครีบรูปตัววีมุม 45° มีทิศทางเดียวกับการไหล และแนวครีบรูปตัววีมุม 60° มีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหล ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re = 15000 - 90000$ พบว่าแนวครีบรูปตัววีมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ในขณะที่แนวครีบรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลให้ค่าความดันตกคร่อมมากที่สุด

Han, J.C., J.J. Huang, and C.P. Lee (1993) ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีครีบรูปตัววีและครีบรูปสามเหลี่ยม เพื่อให้เกิดเทอร์บูเลนท์ พบว่าครีบรูปสามเหลี่ยมให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

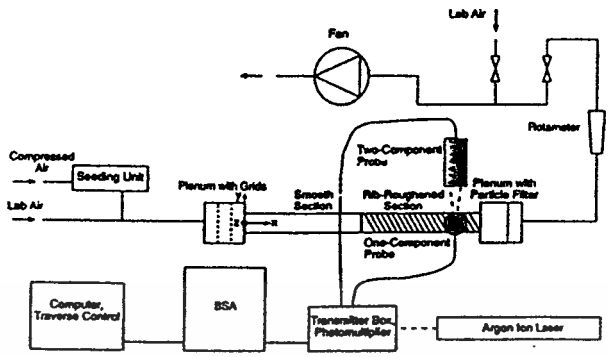
Zhang, Y.M., W.Z. Gu, and J.C. Han (1994) ทำการศึกษาผลของร่องระหว่างครีบในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มี aspect ratio = 1-10 ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re = 10000 - 50000$ และพบว่าร่องระหว่างครีบให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าผนังครีบ แต่มีค่าความดันตกคร่อมเท่ากัน

Taslim, M.E., T. Li, and D.M. Kercher (1996) รายงานค่านัสเซิลล์นัมเบอร์ที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบเนื่องจากมุมครีบ, รูปร่างครีบรูปตัววี และความไม่ต่อเนื่องครีบ (แนวครีบรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่นๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อน พบว่าค่านัสเซิลล์นัมเบอร์มากที่สุดเมื่อแนวครีบรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหล

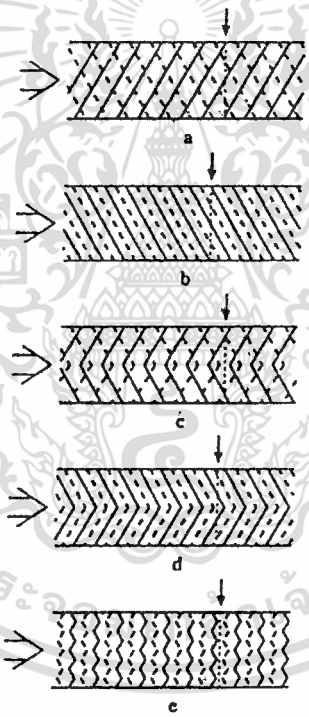
Carl-Olof Olsson and Bengt Sunden (1998) ทำการศึกษารูปแบบการไหล, ความดันตกคร่อม และการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re = 500 - 15000$ ค่า aspect ratio ของท่อสี่เหลี่ยม์คือ 1-8, และครีบถูกติดกับผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม ทำการทดสอบครีบต่างๆ ดังนี้ ครีบถูกติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม, ครีบถูกติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม, ครีบรูปตัววีถูกติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม, ครีบรูปตัววีถูกติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม และครีบรูปตัววีแบบต่อสลับทิศทางกัน (แนวครีบรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม การถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมถูกแสดงโดยตัวประกอบ j (Colburn heat transfer factor) และตัวประกอบ f (Fanning friction factor) พบว่าครีบรูปตัววีแบบต่อสลับทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันให้ค่าตัวประกอบ j และค่าตัวประกอบ f มากกว่าครีบรูปอื่นๆ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re = 1000 – 2000



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Carl-Olof Olsson and Bengt Sunden

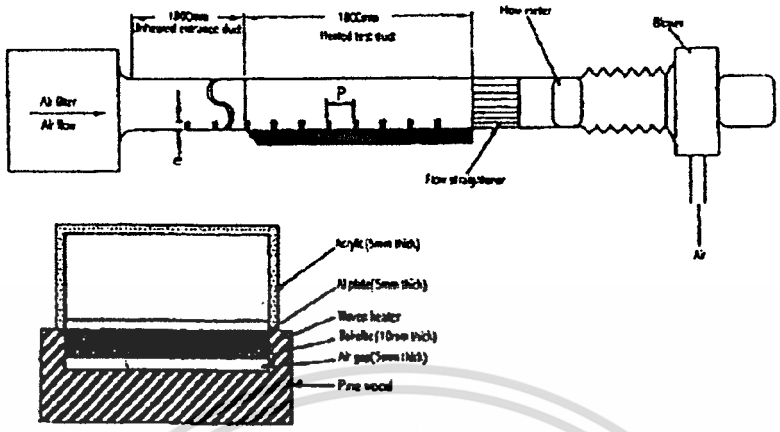


รูปที่ 2.2 Rib configurations: (a) cross rib-roughened (b) parallel rib-roughened (c) cross V-rib-roughened (d) parallel V-rib-roughened (e) Swirl Flow Tube

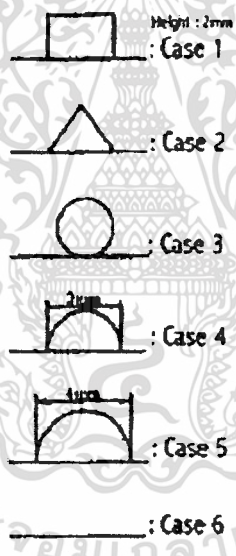
Ahn, S.W. (2001) ทำการศึกษาผลกระทบของครีบรูปแบบต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบแรงเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยม โดยทำการศึกษารูปทรงครีบ 5 ชนิด ได้แก่ครีบรูปสี่เหลี่ยม ครีบรูปสามเหลี่ยม ครีบกลม ครีบครึ่งวงกลมทรงต่ำ และครีบครึ่งวงกลมทรงสูง โดยทำการศึกษาที่ความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค (e/D_h) เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.0476 อัตราส่วนระยะพิตต์ต่อความสูงครีบ (p/e)เท่ากับ 8 และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ 2.33



รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Ahn, S.W.

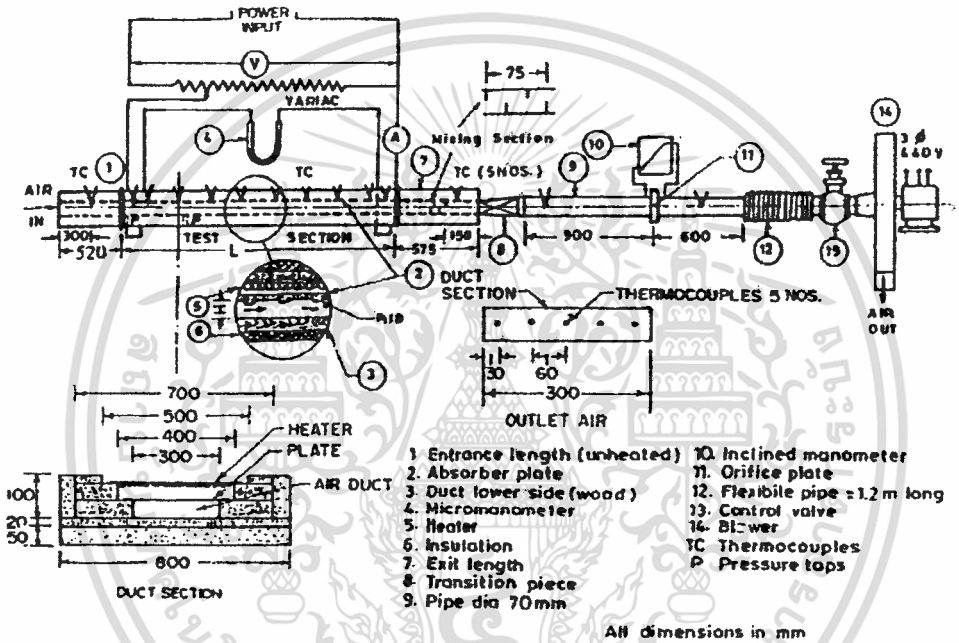


รูปที่ 2.4 รูปแบบครีบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Ahn, S.W.

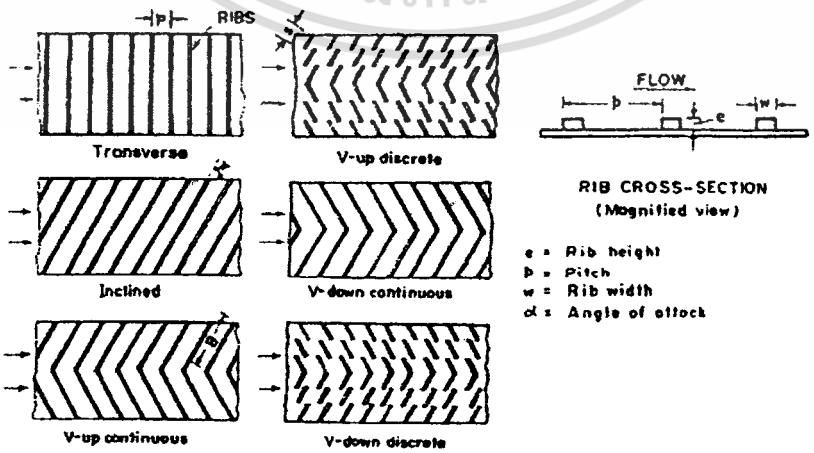
จากการทดลองพบว่าแผ่นครีบสามเหลี่ยมมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ตามด้วยครีบสี่เหลี่ยม ส่วนครีบกลมและครึ่งวงกลมมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน โดยที่ช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re = 10000 แผ่นครีบสามเหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นเรียบ 3 เท่า ในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re = 20000 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมพบว่าแผ่นครีบสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมมากที่สุด ตามด้วยแผ่นครีบสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rajendra Karwa (2003) ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในท่อเหลี่ยมที่มีครีบวางอยู่หนึ่งด้าน โดยครีบที่ทดสอบมีลักษณะเป็นครีบตรง ครีบเอียง ครีบรูปตัววี ทั้งในลักษณะยาวต่อเนื่อง และแบบแยกส่วน โดยอุปกรณ์ที่ทดสอบมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงท่อสี่เหลี่ยมเท่ากับ 7.19 ถึง 7.75 ความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค (e/D_h)เท่ากับ 0.0476 และ 0.050 และระยะพิตต์ต่อความสูงครีบ (p/e)เท่ากับ 10 โดยครีบรูปตัววีที่ทดสอบเป็นครีบรูปตัววีทำมุม 60 องศา และครีบทแยงมุม โดยทำการทดลองในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re = 2800 – 15000 และความร้อนที่ให้กับท่อสี่เหลี่ยมเป็นฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat Flux)



รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Rajendra Karwa

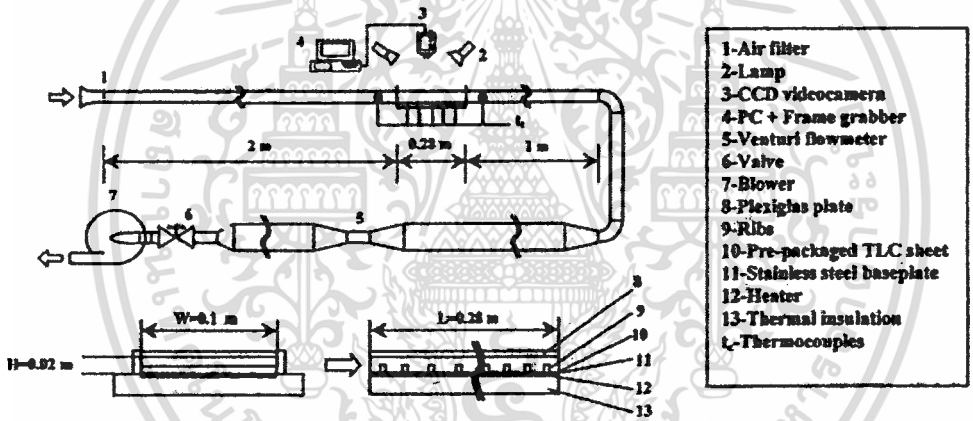


รูปที่ 2.6 รูปแบบครีบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Rajendra Karwa

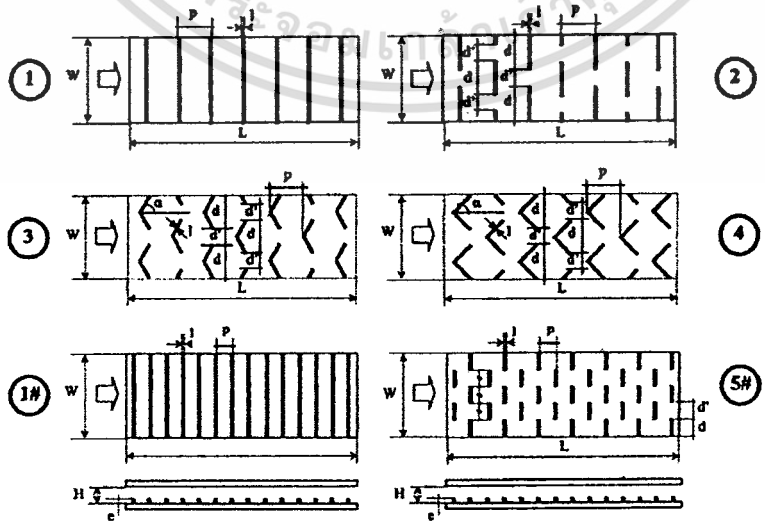
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าแผ่นครีบรูปตัววียาวต่อเนื่องมีค่าตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด และมีค่ามากกว่าแผ่นเรียบประมาณ 3.40 ถึง 3.92 เท่า ส่วนแผ่นครีบรูปตัววีชนิดยาวไม่ต่อเนื่องมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแผ่นครีบลักษณะต่างๆ และมีค่ามากกว่าแผ่นเรียบประมาณ 2.35 ถึง 2.47 เท่า ในขณะที่ค่าสแตนตันนัมเบอร์ (Stanton number) สำหรับแผ่นครีบรูปตัววีมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลจะมีแนวโน้มมากที่สุดคือ 2.10 ถึง 2.47 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ และมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับครีบตรง

Giovanni Tanda (2004) ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบยาวต่อเนื่องและครีบยาวไม่ต่อเนื่อง โดยทำการทดลองในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $\mathrm{Re} = 8900 - 28500$ ความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค (e/D_h)เท่ากับ 0.09 และ 0.15 อัตราส่วนระยะพิตต์ต่อความสูงครีบ (p/e)เท่ากับ 8 และ 13.3 และความสูงครีบต่อระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองเท่ากับ 0.15 และ 0.25



รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Giovanni Tanda



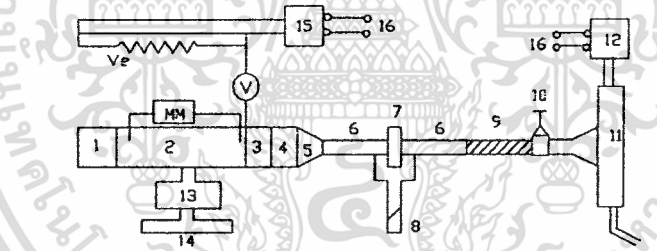
รูปที่ 2.8 รูปแบบครีบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Giovanni Tanda

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

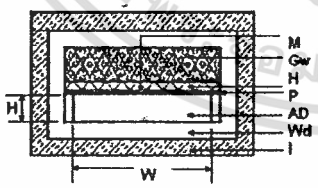
โดยครีบมีความหนา (l)3 มิลลิเมตร มีความสูง (e)3 และ 5 มิลลิเมตร และมีระยะพิตต์ (p)40 มิลลิเมตร แผ่นครีบรูปตัววีมุม 45 และ 60 องศา และครีบยาวไม่ต่อเนื่องมีระยะห่างระหว่างแต่ละครีบ (d') 20 มิลลิเมตร

จากการทดลองพบว่าครีบภายในท่อสี่เหลี่ยมสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางครีบและรูปแบบครีบ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงครีบมีค่าเพิ่มขึ้น ครีบยาวไม่ต่อเนื่องที่ระยะพิตต์ 50 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าที่ระยะพิตต์ 30 มิลลิเมตร ส่วนค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความสูงครีบมีค่าลดลง

Jaurker, A.R., J.S. Saini, and B.K. Gandhi (2005) ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยมชนิดผิว Rib-grooved โดยมีขอบเขตการศึกษาในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $\mathrm{Re} = 3000 - 21000$ ความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค (e/D_h)เท่ากับ 0.0181-0.0363 อัตราส่วนระยะพิตต์ต่อความสูงครีบ (p/e)เท่ากับ 4.5-10.0 และระยะร่องต่อระยะพิตต์ (g/p)เท่ากับ 0.3-0.7



(a) Experimental setup

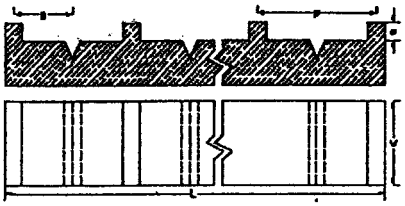


(b) Enlarged view of test cross section

1. Inlet section (560 mm x 156 mm)	11. Blower
2. Test section (1200 mm x 156 mm)	12. Electric motor Selector-switch
3. Mixing section (300 mm x 156 mm)	13. Selector-switch
4. Outlet section (540 mm x 156 mm)	14. Temperature Recorder
5. Transition section	15. Power source
6. G. I. pipe, 78 mm diameter	16. Voltage stabilizer
7. Orificemeter	MM Micro-manometer
8. Manometer	V Volt meter
9. Flexible pipe	A Ammeter
10. Control valve	Ai Air inlet
	Ve Variac

รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Jaurker, A.R., J.S. Saini, and B.K. Gandhi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



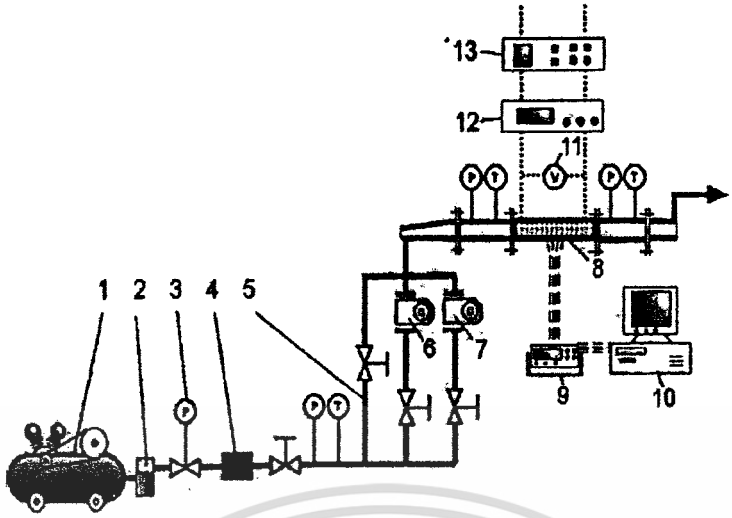
รูปที่ 2.10 รูปแบบครีบที่มีร่อง (Rib-grooved) ของ Jaurker, A.R., J.S. Saini, and B.K. Gandhi

จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผ่น Rib-grooved จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผ่น Rib-grooved จะมีค่ามากกว่าแผ่น Rib อย่างเดียว และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระยะพิตต์ต่อความสูงครีบ (p/e) มีค่าลดลง และมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนระยะพิตต์ต่อความสูงครีบ (p/e) เท่ากับ 6 เมื่อระยะร่องต่อระยะพิตต์ (g/p) มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์ Nu มีค่าสูงสุดเมื่อระยะร่องต่อระยะพิตต์ (g/p) เท่ากับ 0.4 และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะร่องต่อระยะพิตต์ (g/p) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค (e/D_h) มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ส่วนค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระยะพิตต์ต่อความสูงครีบ (p/e) มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอัตราส่วนระยะพิตต์ต่อความสูงครีบ (p/e) เท่ากับ 6 และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนระยะพิตต์ต่อความสูงครีบ (p/e) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะร่องต่อระยะพิตต์ (g/p) มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor) มีค่าสูงสุดเมื่อระยะร่องต่อระยะพิตต์ (g/p) เท่ากับ 0.4 และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะร่องต่อระยะพิตต์ (g/p) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค (e/D_h) มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

Benlu and Pei-Xue Jiang (2005) ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยม ครีบเอียงทำมุม 0, 20, 30, 45, 60 และ 90 องศากับทิศทางการไหล โดยมีขอบเขตการศึกษาในช่วงอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ $0.001-0.0018\,kg/s$ ครีบมีความสูง 0.8 มิลลิเมตร มีความกว้าง 1 มิลลิเมตร และมีระยะพิตต์ 4 มิลลิเมตร

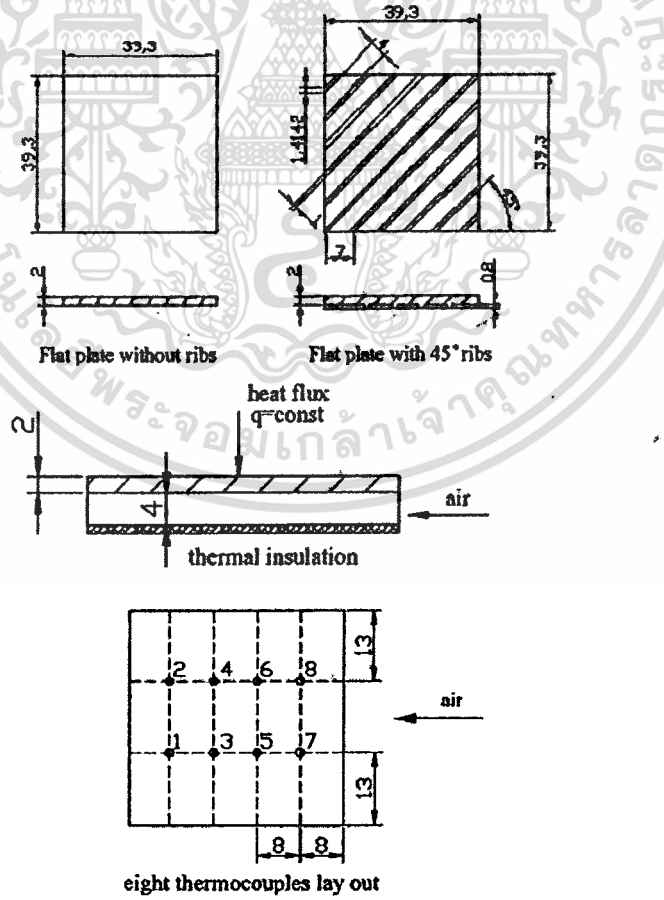
จากการทดลองพบว่าครีบมุม 60 องศาให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมมากที่สุด ครีบมุม 0 องศาให้ค่าความดันตกคร่อมน้อยที่สุด และครีบมุม 20 องศาให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดีที่สุด เมื่อครีบมุม 20 องศามีระยะพิตต์น้อยลงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้น และที่ระยะพิตต์ 1 และ 2 มิลลิเมตร พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดและมีค่าความดันตกคร่อมใกล้เคียงกัน ในขณะที่ระยะพิตต์ 6 มิลลิเมตรให้ค่าความดันตกคร่อมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับครีบมุมเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1-compressor 2-water filter 3-pressure regulator 4-filter
5-by-pass 6-volumetric flow meters (0.75-7.5 m^3/h)
7-volumetric flow meters (4.5-45 m^3/h) 8-test section
9-Keithley 2700 data acquisition 10-computer
11-TX3 voltmeter 12-voltage regulator
13-TND_10000B voltage stabilizer

รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Benlu and Pei-Xue Jiang



รูปที่ 2.12 รูปแบบครีบของ Benlu and Pei-Xue Jiang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
เงื่อนไขในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

3.1 เงื่อนไขในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

คำนิยามของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมหมายถึง เครื่องมือใดๆ ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลที่มีระดับพลังงานความร้อน (อุณหภูมิ) แตกต่างกัน 2 ชนิด ผ่านผนังกั้นระหว่างของไหลทั้งสอง ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สิ่งแรกที่จะต้องศึกษาคือ คุณสมบัติของไหลที่ใช้ จากนั้นจึงทำการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับจุดประสงค์และเงื่อนไขของการใช้มากที่สุด หัวข้อที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง และถูกหลักเศรษฐกิจด้วย

3.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล (Physical Properties of Fluid)

คุณสมบัติของของไหลที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคือ ความหนืด ความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล ปริมาณของสิ่งเจือปนหรืออนุภาคของแข็งที่มีอยู่ในของไหล ตลอดจนคุณสมบัติของสิ่งเจือปนเหล่านั้น เนื่องจากว่าสิ่งเจือปนอนุภาคของแข็งและตะกอนมักจะสะสมในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จนเกิดการกีดขวางการไหลหรือเกาะเป็นคราบ (Scale) ติดกับผิวนำความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนลดลง จึงควรระวังเป็นพิเศษ ในกรณีที่มีการระเหยหรือการควบแน่นของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าสภาพการไหลของของไหลไม่เหมาะสม อาจเกิดการสั่นสะเทือนราวกับถูกฆ้อนน้ำ (Water hammer) หรือเกิดการสะสมของก๊าซ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องลดลง

3.1.2 เงื่อนไขของการเดินเครื่อง (Operating Conditions)

เงื่อนไขต่างๆ ที่เกี่ยวกับความแข็งแกร่งของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกกำหนดโดยความดันและอุณหภูมิของของเหลวที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้วิธีแลกเปลี่ยนความร้อนและความแข็งแกร่งของวัสดุที่ใช้ปลอดภัยพอสำหรับการปฏิบัติงาน เราจำเป็นต้องใช้เงื่อนไขของการเดินเครื่องในการคำนวณความหนาของเชลล์ (Shell) ที่บางที่สุดที่ต้องใช้ ตลอดจนสัดส่วนของแฟลนจ์ (Flange) ที่เหมาะสม

ในกรณีที่ต้องจำกัดผลการลดความดันของของไหลระหว่างทางออกและทางเข้าของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอย่างเคร่งครัด เราควรจะพิจารณาทบทวนแบบของเครื่องที่เลือกไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว ในกรณีที่การเดินเครื่องเป็นแบบพักๆ (batch) ปริมาณของของไหล เวลาที่ใช้ในการเดินเครื่อง และผลต่างของอุณหภูมิที่ยอมให้ได้ในการเดินเครื่องแต่ละครั้ง เป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงด้วย

3.1.3 คุณสมบัติทางเคมีของของไหล (Chemical Properties of Fluid)

การเกิดสนิม (Corrosion) และการกัดเซาะ (Erosion) ผิวสัมผัสของการไหลเป็นปัญหาสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงเสมอ ในการออกแบบอุปกรณ์ทางอุตสาหกรรมเคมี การเกิดสนิมเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ของไหลกระทำต่อผิวสัมผัส ซึ่งโดยปกติแล้ว ผิวสัมผัสจะถูกกัดให้บางลงอย่างสม่ำเสมอ แต่ในบางครั้งสนิมอาจกัดเฉพาะแห่ง เนื่องจากปรากฏการณ์ทางด้านเซลล์ไฟฟ้า ส่วนการกัดเซาะนั้นเกิดจากการปะทะของของไหลกับผิวสัมผัส หรืออาจจะเป็นผลของความสึกหรอที่เกิดจากความดันต่ำที่เกิดขึ้น ณ จุดบางจุด วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงควรเป็นวัสดุที่ไม่เกิดสนิมง่าย หรือถูกกัดเซาะโดยของไหลที่ใช้

สิ่งที่กล่าวถึงข้างต้นนี้คือ ปัจจัยทั้งหมดที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกแบบและวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในขณะเดียวกันยังต้องคำนึงถึงราคาของการผลิตของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประกอบเข้าไปด้วย

3.2 ความเหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Optimization)

ถึงแม้ว่าการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาตรฐานทั่วๆไป จะเป็นที่พอใจของความต้องการในการทำงาน หน่วยธรรมดาที่อุณหภูมิและความดันปานกลางสำหรับกรณีโดยเฉพาะ ถูกออกแบบให้ใช้ได้กับงานพิเศษได้มากมาย คือได้ช่วงอุณหภูมิและความดันตั้งแต่ค่าต่ำๆ จนค่าสูงๆ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลายตัว ถูกออกแบบสำหรับงานหลากหลายชนิด ดังนั้นมาตรการสำหรับความเหมาะสมที่สุด ขึ้นกับชนิดของงานที่จะนำไปใช้ เช่น มาตรการที่เหมาะสมที่สุด อาจจะถูกต้องการให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีน้ำหนักน้อยที่สุด ปริมาตรหรือพื้นที่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่สุด เช่นถ้าต้นทุนในการผลิต (Initial Cost) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (Operation Cost) จะมีค่าสูงเพราะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดใหญ่ ต้องใช้สารทำงาน (Working fluid) มากกว่า และต้องใช้ Pump ใหญ่ขึ้น Pressure Drop ก็มากกว่าด้วย ต่อมาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนควรมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด แต่ความดันที่ลดลงน้อยสุด (Pressure Drop) ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยน้อยที่สุด

ดังนั้นเพื่อที่จะนำไปสู่การศึกษาความเหมาะสมที่สุด ในการออกแบบด้านอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนควรถูกแสดง และการคำนวณควรถูกการทำซ้ำสำหรับแต่ละการออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่สามารถแปรผันได้ จนกระทั่งมาตรการที่เหมาะที่สุดถูกทำให้พึงพอใจ และได้มีการนำโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในการออกแบบด้านอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Bell อธิบายคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบกระบวนการทางความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Shell and Tube

Shah เกี่ยวกับพื้นฐานของลักษณะเด่นคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการออกแบบทางความร้อนและกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัดรัด

Spalding โครงร่างทั่วไปของลักษณะเด่นของวิธีทาง numerical สำหรับการคำนวณ Fluid Dynamics และสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขั้นพื้นฐาน จะมีการมุ่งความสนใจไปทางด้านการออกแบบให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดกระทัดรัด แต่ให้มีประสิทธิภาพดี

ขั้นแรกของกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดคือ การแก้ปัญหาของการประเมินค่า (Rating Problem) และการกำหนดขนาด (Sizing Problem)

ปัญหาด้านการประเมินค่า (Rating Problem) ถูกเกี่ยวพันกับการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิทางออกและความดันที่ลดลงในแต่ละด้าน และปริมาณต่อไปนี้เป็นปริมาณอย่างกว้างๆ ที่ระบุในปัญหาการประเมินค่าคือ ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, พื้นผิวรูปทรงเรขาคณิต, การจัดการการไหล, อัตราการไหล และอุณหภูมิด้านเข้า

ปัญหาด้านขนาด (Sizing Problem) ถูกเกี่ยวพันกับการหาค่ามิติของเมตริกซ์ เพื่อจะได้พบการถ่ายเทความร้อนจำเพาะ (Specific heat transfer) และความดันลดลง (Pressure Drop) ที่ต้องการ

งานของผู้ที่จะออกแบบคือ การเลือกชนิดของโครงสร้าง, การจัดการการไหล และพื้นผิวรูปทรงเรขาคณิตทั้งสองด้าน

ปริมาณต่อไปนี้เป็นปริมาณอย่างกว้างๆ คือ อุณหภูมิของเหลวที่ทางเข้าและอุณหภูมิทางออก, อัตราการไหล, ความดันลดลง และอัตราการถ่ายเทความร้อน

Shah อธิบายจุดเด่นของความสำคัญของคอมพิวเตอร์ ในการทำ Subroutine ที่ถูกต้อง ให้มีการคิดคำนวณการหาขนาด และการประเมินอัตราต่างๆ ซึ่งรวมถึงข้อต่อไปนี้

1. การออกแบบโดยเฉพาะ (Design specific) การออกแบบโดยเฉพาะที่มีการกำหนดแน่นอนที่สมบูรณ์ ควรถูกหาได้ที่ Computer subroutine ข้อมูลควรรวบรวมชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, การจัดการการไหล, พื้นที่ผิวเรขาคณิต, ค่าสภาวะการทำงาน เช่น อุณหภูมิทางเข้า, ความดัน, อัตราการไหล, ชนิดของของเหลว และอื่นๆ

2. คุณสมบัติของของเหลว (Fluid Properties) คุณสมบัติทางกายภาพหลายๆ อย่างของของเหลว เช่น ความร้อนจำเพาะ, ความหนาแน่น, ความหนืด, ค่าการนำความร้อน และเพลนตันนัมเบอร์ ค่าเหล่านี้ควรถูกรวมเป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิในเทอมที่มีความสัมพันธ์ร่วมกัน หรือที่เรียกว่าสหสัมพันธ์ (Correlation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Matrix geometry ข้อมูลที่บ่งบอกพฤติกรรมของ Matrix geometry ควรถูกแบ่งแต่ละด้านของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงพื้นที่ที่มีการไหลแบบอิสระให้น้อยที่สุด, เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์, ขนาดครีบ ถูกจำเป็นสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพของครีบ และอื่นๆ

4. ความสัมพันธ์ระหว่าง ε-NTU (ε-NTU Relation) เนื่องจากวิธี ε-NTU ถูกนำไปใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัดรัด การกำหนดสูตรหลายๆ สูตรของความสัมพันธ์ระหว่าง ε-NTU ควรถูกจัดทำขึ้น ความสัมพันธ์ควรนำไปใช้ได้กับกรณีทั่วไปในการหา เมื่อรู้ NTU และ $C = C_{min}/C_{max}$ และคำนวณ NTU เมื่อรู้ ε และ C

5. ความสัมพันธ์ h และ f (h and f relation) ลักษณะเฉพาะของการแลกเปลี่ยนความร้อนและความเสียดทานการไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัดรัด ถูกใช้ในเทอม j และ f และ plot กราฟ ในเทอมของ Reynolds number และ ข้อมูล h, f และ Re ควรถูกจัดทำขึ้นเป็นสหพันธ์ (Correlation)

6. ประสิทธิภาพครีบ (Fin Efficiency) เมื่อพื้นผิวถูกขยาย มีการใช้ใน Heat Transfer Matrix ประสิทธิภาพครีบ (η) และประสิทธิภาพของพื้นที่ครีบ (η') ถูกต้องการในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นในการกำหนดสูตรประสิทธิภาพครีบ และข้อมูลถูกต้องการสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพของพื้นที่ครีบควรถูกจัดทำ

7. ความดันลดลง (Pressure Drop) ความดันที่ลดลงสำหรับการไหลผ่านตลอด Matrix เกิดจากความเสียดทานการไหล การเร่งและการหน่วง อันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อน, การหดและการขยายที่ทางเข้าและทางออกของ Matrix ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมควรถูกทำขึ้น การคำนวณความดันที่ลดลงเนื่องจากสาเหตุหลัก และรวมทั้งข้องอ (Bends), หัวจ่าย (Headers) และท่อรวม (Mainfolds)

Rating Problem ถ้าเป็นปัญหาเกี่ยวข้องกับการเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งถูกสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือความดันลดลง ถัดมา Rating Problem ถูกแก้ปัญหาและเป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันลดลงถูกคำนวณ การแก้ปัญหาของ Rating Problem จะถูกคอมพิวเตอร์นำมาคิดแทน

Sizing Problem ถ้าปัญหาเกี่ยวข้องกับการเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งถูกสัมพันธ์กับขนาด, น้ำหนัก หรือพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงราคาด้วย ดังนั้น Sizing Problem ถูกแก้ปัญหา และขนาดของแกนกลางของ Matrix และพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนถูกคำนวณ

Optimization Problem มาตรการที่เหมาะสมที่สุดขึ้นกับงานโดยเฉพาะ ดังนั้นปริมาณที่จะถูกทำให้เกิดสภาวะเหมาะสมที่สุดควรมีการกำหนดว่าต้องการมากสุด (Maximized) หรือต่ำสุด (Minimized) เนื่องจากอาจจะมีเงื่อนไขบางตัว ถูกเพิ่มเข้ามา หนึ่งในความหลากหลายของวิธีหลายๆ วิธี อาจจะถูกนำมาใช้ให้ถึงจุดของการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนั้นก็จะถูกปรับให้เหมาะกับแต่ละกรณีที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาของ Rating Problem หรือ Sizing Problem

เอกสารนี้ได้รับการคุ้มครองลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาดการณ์ไว้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบเหมาะสมที่สุด สำหรับราคาถูกที่สุด ปัญหาเกี่ยวพันเงื่อนไขที่เปิดเผยเห็นแจ้ง เช่น พื้นที่ด้านหน้าที่ถูกคงที่ (Fixed Frontal Area) และช่วงของขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเงื่อนไขที่แสดงเป็นนัย (Implicit Constraints) โดยเฉพาะอัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด และความดันลดลงมากที่สุด ครั้งหนึ่งพื้นที่ผิวเรขาคณิตถูกเลือก ผู้ออกแบบมีทางเลือกในการเพิ่มเงื่อนไข เช่น ค่าต่ำสุดและสูงสุดของความสูงครีบ, ความหนาครีบ, ระยะห่างระหว่างครีบ, ค่าการนำทางความร้อนครีบ, ความยาวครีบ, อัตราการไหลของแก๊ส ดังนั้นปัญหาลดลงจากการแก้ปัญหาของ Rating Problem ภายในช่วงของการปรับค่าที่เจาะจง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

74456

บทที่ 4
การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

4.1 การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การแบ่งประเภทการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาจกระทำได้ 6 วิธีคือวิธีแบ่งประเภทตามสภาวะของของไหลที่ใช้ วิธีแบ่งประเภทตามลักษณะการใช้งาน หรือจุดประสงค์ของการใช้งาน วิธีแบ่งประเภทตามโครงสร้างของอุปกรณ์ วิธีการแบ่งตามขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วิธีการแบ่งตามการถ่ายเทความร้อน และวิธีการแบ่งตามการไหลของของไหล

4.1.1 การแบ่งประเภทตามสภาวะของของไหลที่ใช้

วิธีการแบ่งนี้เป็นที่บ่งว่าของไหล 2 ประเภทที่ทำการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านผนังถ่ายเทความร้อนมีสภาวะเป็นอะไร และมีการเปลี่ยนสภาวะภายในระหว่างแลกเปลี่ยนความร้อนหรือไม่

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวกับของเหลว (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ ของไหลทั้ง 2 ชนิดต่างก็เป็นของเหลว ซึ่งเพียงแต่ถูกให้ร้อนขึ้น หรือเย็นลงเท่านั้น ตัวอย่างเช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำมันก้นหอกลั่น และน้ำมันดิบในอุปกรณ์กลั่นน้ำมัน เป็นต้น

2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวกับของเหลว (มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ของเหลวฝ่ายหนึ่งในเครื่องจะเปลี่ยนสภาวะเป็นก๊าซหรือระเหยเป็นไอในระหว่างแลกเปลี่ยนความร้อน ยกตัวอย่างเช่น เครื่องต้มน้ำ (Reboiler) ของหอกลั่นน้ำมัน ซึ่งใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงเป็นแหล่งความร้อน เป็นต้น

3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับก๊าซ (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ของไหลทั้ง 2 ชนิดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างเป็นก๊าซ ซึ่งไม่เกิดการควบแน่นเป็นของเหลว ตัวอย่างเช่น เครื่องอุ่นอากาศ (Air preheater) ซึ่งใช้ก๊าซทิ้งเป็นแหล่งความร้อน เป็นต้น

4. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับก๊าซ (มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ของไหลฝ่ายหนึ่งในเครื่องจะควบแน่นเป็นของเหลวในระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อน ยกตัวอย่างเช่น เครื่องกระจายความร้อน (Radiator) สำหรับทำความอบอุ่น โดยการทำอากาศให้อุ่นด้วยไอน้ำ

5. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ ของไหลฝ่ายหนึ่งของผนังถ่ายเทความร้อนจะเป็นก๊าซ ส่วนของไหลอีกฝ่ายหนึ่งจะเป็นของเหลว ยกตัวอย่างเช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อน (Economizer หรือ Feed water Preheater) ซึ่งในก๊าซทิ้งจากหม้อไอน้ำเป็นแหล่งความร้อน

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว (มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ) ยกตัวอย่างเช่น หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water tube boiler) ซึ่งระเหยน้ำให้เป็นไอด้วยก๊าซสันดาป และเครื่องควบแน่น (Condenser) ซึ่งควบแน่นไอให้เป็นของเหลวด้วยน้ำระบายความร้อน เป็นต้น

วิธีการแบ่งประเภทตามสภาวะของของไหลนี้ สะดวกสำหรับการหาค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้

4.1.2 การแบ่งประเภทตามจุดประสงค์ของการใช้งาน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่แบ่งประเภทตามจุดประสงค์ของการใช้งาน หรือลักษณะการใช้งานนั้น แบ่งออกได้ดังนี้

1. เครื่องระเหย (Evaporator) หรือหม้อเคี่ยว (Concentrator) จุดประสงค์ของการใช้งานคือการระเหยของเหลวให้เป็นไอ เพื่อใช้ไอที่เกิดขึ้นให้เป็นประโยชน์หรือเพื่อให้ได้ของเหลวที่เข้มข้นขึ้นโดยทั่วไป นอกจากส่วนของการถ่ายเทความร้อนแล้ว ยังมีส่วนสำหรับสะสมไอด้วย ดังนั้นรูปร่างภายนอกจึงมักจะดูแตกต่างจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

2. เครื่องอุ่นหรือเครื่องทำให้ร้อนล่วงหน้า (Preheater) จุดประสงค์ก็เพื่ออุ่นหรือทำให้ของเหลวร้อนล่วงหน้า เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ โดยทั่วไปมักจะเรียกชื่อตามการใช้งาน หรือตามประเภทของไหลที่อุ่นให้ร้อน ยกตัวอย่างเช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ (Boiler feed water preheater)

3. เครื่องทำให้ร้อน (Heater) จุดประสงค์ก็เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของของไหลให้สูงขึ้น โดยการให้ความร้อน

4. เครื่องทำให้ร้อนยิ่งยวด (Super-heater) เครื่องนี้ทำหน้าที่เพิ่มความร้อนแก่ของไหลที่ถูกทำให้ร้อนมาแล้ว เพื่อให้อยู่ในสภาพร้อนยิ่งยวด ยกตัวอย่างเช่น เครื่องดงไอ (Stream Superheater) เป็นต้น

5. เครื่องต้มซ้ำ (Reboiler) เครื่องนี้ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ของเหลวควบแน่น เพื่อระเหยให้เป็นไออีกครั้งหนึ่ง แสดงตัวอย่างของการใช้เครื่องต้มซ้ำ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ใกล้ฐานของหอกลั่น หน้าที่ของเครื่องในที่นี้คือ การให้ความร้อนแก่น้ำมันก้นหอ เพื่อระเหยองค์ประกอบจุดเดือดต่ำที่มีอยู่ในน้ำมันนั้น เครื่องต้มซ้ำมีเป็นแบบกาต้ม (Kettle Type) และแบบกาลักน้ำเชิงความร้อน (Thermosy) ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในภายหลัง

6. เครื่องควบแน่น (Condenser) จุดประสงค์ก็เพื่อควบแน่นไอที่ควบแน่นได้ ให้กลายเป็นของเหลว ยกตัวอย่างเช่น เครื่องควบแน่นไอน้ำให้กลับเป็นน้ำ

7. เครื่องควบแน่นหมด (Total Condenser) เครื่องนี้เป็นเครื่องควบแน่นประเภทหนึ่งที่ใช้หอกลั่น แต่ได้รับการออกแบบให้สามารถควบแน่นไอทั้งหมดที่ออกมาจากยอดของหอกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เครื่องควบแน่นบางส่วน (Partial Condenser) คล้ายกับเครื่องควบแน่นหมด เครื่องควบแน่นบางส่วนนี้เป็นเครื่องประเภทหนึ่งที่ใช้กับหอกลั่น แต่มีจุดประสงค์เพื่อเพียงควบแน่นส่วนหนึ่งของไอที่ออกจากยอดของหอกลั่นให้เป็นของเหลว

9. เครื่องระบายความร้อน (Cooler) เครื่องนี้มีหน้าที่ระบายความร้อนออกจากของไหล เพื่อลดอุณหภูมิของของไหล

10. เครื่องทำให้เย็นจัด (Chiller) เครื่องนี้ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของของไหลให้เหลือต่ำมาก โดยการใช้ตัวทำความเย็น (Refrigerant) จำพวกแอมโมเนียและฟรีออน เป็นต้น

11. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในคำจำกัดความที่แคบนี้ แตกต่างจากเครื่องต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ในแง่ที่ว่ามีจุดประสงค์เพื่อให้ความร้อนแก่ของของไหลตัวหนึ่ง ในขณะเดียวกันระบายความร้อนออกจากของไหลอีกตัวหนึ่ง

จุดประสงค์ของตั้งแต่ (1) เครื่องระเหย จนถึง (5) เครื่องต้มซ้ำ คือการให้ความร้อนแก่ของไหล ส่วนจุดประสงค์ของ (6) เครื่องควบแน่น จนถึง (10) เครื่องทำให้เย็น คือการดึงเอาความร้อนออกจากของไหล อนึ่งจุดประสงค์ของ (11) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือทั้งให้และดึงความร้อน แหล่งความร้อนที่นิยมใช้ในการให้ความร้อน คือไอน้ำ แต่ในบางครั้งแหล่งความร้อนอาจจะเป็นของเหลว เช่น น้ำมันร้อน และน้ำร้อน เป็นต้น หรือเป็นก๊าซเฉื่อยอุณหภูมิสูง เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน หรือเป็นก๊าซทิ้งที่ได้จากการสันดาปเชื้อเพลิง

โดยทั่วไปจะใช้แม่น้ำ หรือน้ำบ่อในการระบายความร้อน หรือควบแน่นไอ แต่ในบางครั้งอาจใช้สารทำความเย็นจำพวกแอมโมเนีย แคลเซียมคลอไรด์ ฟรีออน เป็นต้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องมีใช้เสมอกับหอกลั่น ซึ่งทำหน้าที่แยกองค์ประกอบต่างๆ ออกจากของเหลวผสม โดยอาศัยความแตกต่างของจุดเดือดขององค์ประกอบเหล่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โรงกลั่นน้ำมันจะมีหอกลั่นจำนวนมาก ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าหอกลั่นหนึ่งหอจะต้องการอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 4 ประเภท ดังนั้นจึงทำให้เราสามารถวาดภาพออกได้ว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญมากเพียงไร

4.1.3 การแบ่งประเภทตามโครงสร้างของอุปกรณ์

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีมากมายหลายประเภท แต่เมื่อแยกประเภทตามโครงสร้างของอุปกรณ์แล้ว มีดังต่อไปนี้

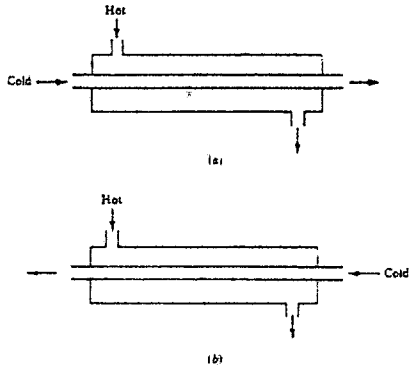
1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ เนื่องจากโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เป็นแบบง่ายๆ และราคาย่อมเยา จึงมีใช้กันมาก ในปัจจุบันจะพบเห็นบ่อยๆ ในรูปของเครื่องระบายความร้อนแบบกล่อง (Box Cooler) ในกระบวนการกลั่นน้ำมัน และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดเล็ก หรือในกรณีที่ใช้ของเหลวที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง โครงสร้างของเครื่องประเภทนี้ไม่ต้องการกรรมวิธีการผลิตที่ละเอียด วัสดุที่ใช้ทำขดท่อ (Coil) มีตั้งแต่ท่อทองแดง ท่อเหล็ก จนถึง

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุที่แปรรูปได้ยาก เช่น กระเบื้องดินเผา เซรามิค แก้ว เหล็กหล่อซิลิกอนสูง (High Silicon Cast Iron) กราไฟท์ (Graphite) ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rasin) เป็นต้น เนื่องจากเป็นขดท่อจึงมีความแข็งแกร่งสูง แม้ว่าของไหลในท่อจะมีความดันสูง ดังนั้น ข้อดีคือ ปัญหาของการรั่วไหลมีน้อย แต่มีข้อเสียคือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนต่ำ และมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับสัดส่วนภายนอกของเครื่อง ด้วยเหตุนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเครื่องจึงมีค่าน้อย เครื่องแบบนี้มักใช้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของของเหลวในถังเก็บให้มีค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ

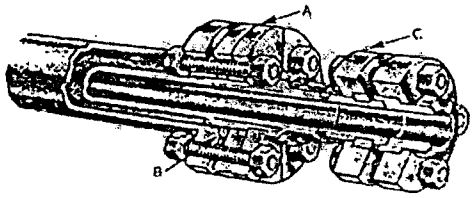
2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปิด เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ใช้ระบายความร้อนโดยการปล่อยให้น้ำหยดลงบนท่อที่ติดตั้งอยู่ในแนวระดับ เพื่อลดอุณหภูมิของของไหลที่ไหลอยู่ภายในท่อ ชื่อเรียกอื่นๆ ของเครื่องประเภทนี้ก็มี เช่น เครื่องระบายความร้อนแบบทริกเคิล (Trickle Cooler) แบบทรอมโบน (Trombone Cooler) แบบคาสเคด (Cascade Cooler) หรือแบบตัว S (S-type Cooler) เป็นต้น โครงสร้างทั่วไปประกอบด้วยท่อตรงและส่วนโค้ง (Bend) และสามารถวางซ้อนกันหลายๆชั้น เพื่อเพิ่มความสามารถทำงานของเครื่อง เครื่องแบบนี้เหมาะที่จะใช้กับของไหลความดันสูงที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง เพราะโอกาสที่จะเกิดการรั่วไหลมีน้อย และถ้าเกิดการรั่วไหลขึ้นก็รู้ได้ทันที วัสดุที่ใช้ทำท่อมีตั้งแต่ท่อเหล็ก จนกระทั่งวัสดุประเภทต่างๆ ที่ทนการกัดกร่อนเช่นเดียวกับที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ

3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น โครงสร้างของเครื่องแบบนี้ประกอบด้วยท่อ 2 ขนาดซ้อนกันอยู่ โดยมีแกนกลางของท่อร่วมกัน ของไหลชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในท่อใน และของไหลอีกชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในช่องว่างรูปวงแหวนระหว่างท่อในและท่อนอก โดยทั่วไปปลายข้างหนึ่งจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยท่อโค้งรูปตัว U (U-Bend) ดังรูปที่ 4.1 บางทีก็เรียกชื่อตามรูปร่างของเครื่องว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแฮร์พิน เครื่องแบบนี้เหมาะสำหรับการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของของไหลภายในท่อที่มีความดันสูง ความหนืดสูง หรือฤทธิ์กัดกร่อนสูง ในบางครั้งจะใช้ท่อที่มีครีบเป็นท่อชั้นในเพื่อเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อน และความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเครื่อง



รูปที่ 4.1 ลักษณะการไหลในท่อสองชั้น (a) parallel flow (b) counter flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

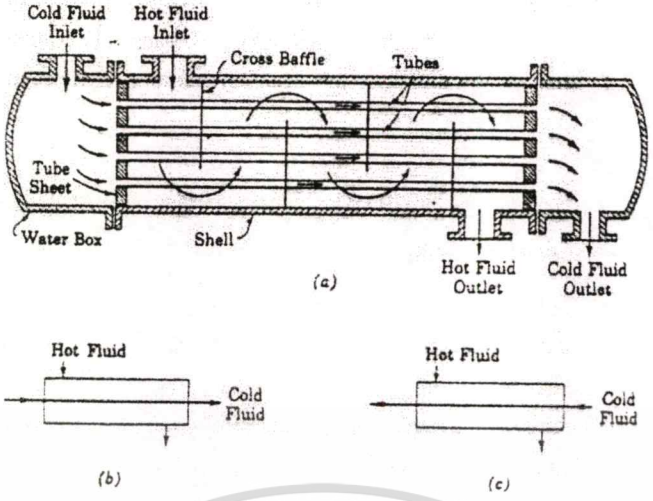


รูปที่ 4.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

ลักษณะเด่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นคือ โครงสร้างค่อนข้างง่าย ราคาของเครื่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ความร้อนมีราคาถูก และเมื่อมีความจำเป็น สามารถเพิ่มความสามารถทำงานได้ง่าย โดยการเอาเครื่องที่มีสัดส่วนเหมือนๆกันหลายๆชุดมาต่อกันแบบอนุกรม (Series) หรือแบบขนาน (parallel) เพื่อให้ของไหลไหลสวนทางกันด้วยความเร็วที่เหมาะสม ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ได้จะมีค่าสูง ในขณะที่ความดันสูญเสียมีค่าต่ำ แต่ว่าเมื่อขนาดของเครื่องเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ปริมาตรของเครื่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มตามขึ้น ทำให้ราคาของเครื่องค่อนข้างแพง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่น ดังนั้นเครื่องแบบนี้จึงควรเลือกใช้ในกรณีที่ปริมาณการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างน้อย หรือในกรณีที่ต้องการพื้นที่ถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า 20 ตารางเมตร

4. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมีส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นประเภทนี้ เนื่องจากความนิยมใช้อุปกรณ์ประเภทนี้มีมากที่สุด ส่วนประกอบของ Heat Exchanger จะมีพวก tube bundle, shell, front and rear end header, and baffles เป็นตัวใช้ในการสนับสนุน (support) tube ทำให้เพิ่มการเป็นเทอร์บูเลนท์ หลักการเลือก baffles จะขึ้นกับช่องว่าง, อัตราการไหล (flow rate), การเกิด pressure drop และ tube support requirement และการไหลที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนภายในท่อ ลักษณะของชนิดของของไหล แบ่งเป็นหลายแบบเช่น liquid to liquid, liquid to gas, gas to gas, liquid to liquid fluid ทั้ง 2 จะถูก pump ผ่าน Exchanger ดังนั้น Heat transfer ทั้งภายในและภายนอก tube จะเป็นแบบ forced convection ดังนั้น heat transfer coefficient จะสูงโดยเกิดจากการไหลของของไหลอยู่แล้ว ไม่จำเป็นต้องติดครีบหากเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ liquid to gas ครีบจะต้องถูกตัดเข้าไปใน gas side ของ tubes ซึ่งเป็นจุดที่ค่า Heat transfer coefficient ต่ำ แบบ gas to gas จะใช้กับ Exhaust gas และเครื่องอุ่นอากาศ สำหรับระบบ gas-turbine, cryogenic gas-liquefaction system และ stell furnaces ทั้งในและนอก tube จะมีการติดครีบเข้าไปเพื่อเป็นการเพิ่ม Heat transfer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

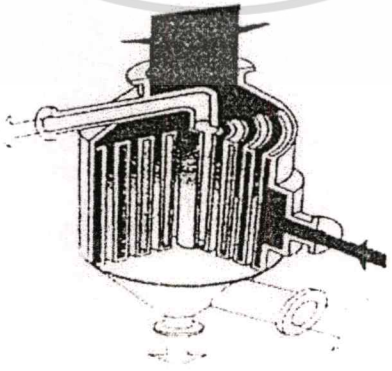


รูปที่ 4.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน shell and tube แบบ (a) one shell pass และ one tube pass (b) parallel flow (c) counterflow

5. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบดาบปลายปืน

เส้นทางการไหลภายในท่อประกอบด้วยท่อนอก ซึ่งปลายข้างหนึ่งมีฝาปิดอยู่ และท่อในซึ่งสอดอยู่ในท่อนอก ของไหลภายในท่อจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลภายในเชลล์ในระหว่างที่ไหลอยู่ในช่องว่างระหว่างท่อในและท่อนอก เนื่องจากมัดท่อของเครื่องประเภทนี้ สามารถติดตั้งหรือถอดออกได้โดยไม่เกี่ยวข้องของเหลวภายในเชลล์ เครื่องประเภทนี้สะดวกที่จะสอดเข้าในภาชนะบรรจุหรือระบบท่อได้โดยตรง เพื่อเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของของไหลในเชลล์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบดาบปลายปืนมีราคาสูง เมื่อเทียบกับเครื่องชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงไม่เหมาะสำหรับงานที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง แต่เหมาะสำหรับใช้กับอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเดิมให้สูงขึ้น

6. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อหมุนวน



รูปที่ 4.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อหมุนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ประกอบด้วยท่อทองแดง ท่ออลูมิเนียม หรือท่อวัสดุอ่อนอื่นๆ ซึ่งเล็กและยาวหมุนวนเป็นเกลียวหลายๆชั้น แล้วบรรจุในภาชนะรูปทรงกระบอก ผลที่ได้คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมาก แต่มีการสูญเสียความร้อนน้อยมาก เพราะพื้นผิวที่ความร้อนหนีออกจากเครื่องมีน้อยโดยโครงสร้าง นอกจากการผลิต การซ่อมแซมทำได้ยากและราคาสูงแล้ว ข้อเสียอย่างอื่นคือ ของไหลในท่อและในเชลล์จะต้องสะอาดและมีฤทธิ์กัดกร่อนน้อยจึงจะใช้ได้ ในปัจจุบันนี้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อหมุนวนส่วนใหญ่จะใช้กับอุปกรณ์แยกก๊าซ ซึ่งทำให้อากาศหรือก๊าซอื่นๆ กลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำมากๆ เพื่อทำการแบ่งแยกต่อไป

7. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ใช้อากาศเป็นตัวระบายความร้อนแทนน้ำเย็น จึงเป็นที่นิยมใช้กันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันนี้ ซึ่งขาดแคลนน้ำระบายความร้อน โครงสร้างของเครื่องมี 3 องค์ประกอบคือ มัดท่อซึ่งประกอบด้วยท่อถ่ายเทความร้อนที่มีครีบ (Fin) โครงเหล็กซึ่งใช้สำหรับยึดมัดท่อ และเครื่องเป่าลมพร้อมมอเตอร์สำหรับเป่าอากาศผ่านมัดท่อ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศมีทั้งแบบที่เป่าพัดอากาศผ่านมัดท่อ (Forced-Draft) และแบบที่ชักนำอากาศให้ผ่านมัดท่อ (Induced-Draft) คุณลักษณะพิเศษของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้คือไม่ต้องอาศัยน้ำเป็นตัวระบายความร้อน (ผลคือไม่ต้องกังวลเรื่องการแสวงหาแหล่งน้ำหรือการแก้ไขคุณภาพของน้ำที่ใช้) และอากาศที่ใช้สำหรับระบายความร้อนก็มีอยู่ไม่จำกัดปริมาณ ยิ่งกว่านั้น เหตุขัดข้องที่เกิดจากสนิมหรือความสกปรกของกรณีที่ใช้น้ำระบายความร้อนก็ไม่มี ข้อดีอย่างอื่นคือค่าบำรุงรักษาถูกกว่ากรณีที่ใช้น้ำ และเวลาเกิดการรั่วไหลของท่อขึ้น เรื่องที่น้ำจะเข้าไปปนกับของเหลวภายในท่อก็ไม่มี อย่างไรก็ดีข้อเสียหลายอย่าง เช่น เสียงดัง ต้องใช้พื้นที่ติดตั้งมาก ค่าก่อสร้างสูง และต้องเลือกสถานที่ติดตั้งให้ดี

8. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปลอกหุ้ม

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปลอกหุ้มนี้ มีใช้ในกระบวนการของอุตสาหกรรมเคมีมาเป็นเวลานาน โครงสร้างของเครื่องประกอบด้วยปลอกหุ้มถังเก็บหรือถังปฏิกรณ์ (Reactor) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน ข้อเสียคือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าต่ำเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อหรือแบบอื่นๆ อีกทั้งพื้นที่ถ่ายเทความร้อนก็ถูกจำกัดโดยขนาดของตัวถัง ดังนั้นจึงไม่เหมาะสำหรับงานที่มีจุดประสงค์หลักเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนข้อดีคือโครงสร้างเป็นแบบง่ายๆ ราคาถูกและความจุของภาชนะภายในสูง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการให้ความร้อนหรือทำความเย็นแก่ของเหลว โดยเฉพาะอย่างยิ่งสะดวกสำหรับการรักษาอุณหภูมิของของเหลวในถังเก็บหรือถังตวงให้คงที่ ในบางครั้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนอาจมีการติดตั้งเครื่องกวนสำหรับของเหลวภายในถัง หรือเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนโดยใช้ขดท่อถ่ายเทความร้อนร่วมด้วย โดยปกติแล้วการทำความสะอาดภายในปลอกหุ้มทำไม่ได้ ดังนั้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลที่ใช้ในปลอกหุ้มควรเป็นไอน้ำ น้ำเย็น ฟรีออน (Freon) หรือแอมโมเนีย (Ammonia) ที่มีความสกปรกน้อย

9. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

ลักษณะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นคือ การเอาแผ่นถ่ายเทความร้อนหลายๆแผ่นมาวางเรียงกันในระยะที่ห่างคงที่ แล้วให้ของเหลวแต่ละชนิดไหลผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นในลักษณะสลับกัน ช่องเว้นช่อง เครื่องแบบนี้มักใช้กับการเพิ่มอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าหม้อไอน้ำ (Boiler) ในกรณีนี้ค่าสูญเสียความดันจะมีน้อย แต่ประสิทธิภาพก็ไม่ดีนัก ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องแบบนี้โดยจะใช้แผ่นเหล็กสแตนเลส (Stainless Steel) บางๆ หรือแผ่นไทเทเนียม (Titanium) ซึ่งทนต่อสนิมได้อย่างดี เอามาอัดให้เกิดส่วนนูน ส่วนเว้า แล้ววางประกอบกันหลายๆแผ่น ของไหลแต่ละชนิดจะไหลสลับหันไปตามช่องว่างที่เกิดจากการประกอบเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มความแข็งแกร่ง ป้องกันอากาศรั่ว และให้มีช่องว่างไหลดี ผิวของแผ่นนำความร้อนจะมีทั้งส่วนนูน และส่วนเว้า ปะเก็น (gasket) จะถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศรั่วไหล และรักษาระยะห่างระหว่างแผ่นที่ต้องการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปรับปรุงใหม่นี้มีค่าสูง ส่วนคุณลักษณะดีเด่นอย่างอื่นคือ สามารถถอดเป็นแผ่นๆออกมาทำความสะอาดได้ทั่วถึง การบำรุงรักษาก็ง่าย และสามารถปรับปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้โดยการเพิ่มหรือลดจำนวนแผ่นถ่ายเทความร้อน เนื่องจากปะเก็นที่ใช้โดยปกติทำจากยางหรือยางสังเคราะห์ จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับอุณหภูมิสูง หรือความดันสูง เครื่องแบบนี้นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมเวชภัณฑ์ และอุตสาหกรรมอาหาร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสูงประมาณ 1300-3500 $kcal/m^2hr^\circ C$ ส่วนความดันและอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ได้ประมาณ 5 kg/cm^2 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แผ่นจะต้องราบเรียบ หากแผ่นไม่สมมาตรจะไม่สามารถใช้กับงานที่ต้องทนความดันกับความดันสูง (high pressure) ค่าของ compactness factor จะอยู่ในช่วง 120 ถึง 230 m^2/m^3 การเอาแผ่นถ่ายเทความร้อน 2 แผ่น มาประกบกันให้เกิดช่องทางไหลเหมือนกับขดท่อ ลักษณะการใช้ มีตั้งแต่การเอามาวางประกบกันหลายๆแผ่น ให้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น การวางใช้ในภาชนะบรรจุแทนขดท่อถ่ายเทความร้อน (Coil) ตลอดจนการวางติดกับผนังถังแทนปลอกหุ้ม (jacket)

10. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหอยโข่ง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้สร้างขึ้นจากแผ่นราบ 2 แผ่นที่เอามาตัดขนานกันให้เหมือนลายหอยโข่ง คุณลักษณะที่ดีเด่นคือ โครงสร้างเป็นแบบไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการยืดหดตัวเชิงความร้อน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสูง เมื่อเทียบกับค่าสูญเสียความดันที่น้อย และการไหลก็สม่ำเสมอด้วย ดังนั้นจึงสามารถออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อน ข้อเสียคือ ทำความสะอาดหรือซ่อมแซมได้ยาก เพราะปกติสร้างขึ้นโดยการเชื่อมโลหะ (Welding) ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้กับของไหลที่สกปรกมาก ของไหลที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฤทธิ์กัดกร่อนแตกต่างกัน หรือของไหลที่มีความดันสูง ในปัจจุบันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้มีใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น แต่การใช้ที่เหมาะสมคือ ใช้เป็นเครื่องทำความเย็นในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้เป็นเครื่องควบแน่นที่ความดันใกล้สูญญากาศ

11. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบล๊อด

ส่วนใหญ่แล้วเลือกการใช้วัสดุประเภทโลหะที่เหมาะกับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารเคมีสองชนิดที่มีฤทธิ์กัดกร่อนผิดแผกกันนั้นทำได้ลำบาก ในกรณีเช่นนี้สมควรที่จะใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบล๊อดซึ่งทำจากตะกั่วดำหรือวัสดุทนการกัดกร่อนอื่นๆ ก้อนๆ เดียว โครงสร้างของเครื่องประกอบด้วย ก้อนวัสดุทนการกัดกร่อนซึ่งเจาะรูยาวจำนวนมากให้ตั้งฉากกันระหว่างแต่ละชั้นของรู ของไหลแต่ละชนิดไหลสลับชั้นกันไปตามรูปที่เจาะไว้ เครื่องแบบนี้มีใช้ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน และเคมีภัณฑ์อื่นๆ แต่โครงสร้างของเครื่องจำกัดการใช้ในเฉพาะกรณีปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ

12. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัดรัด

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ได้มาจากความคิดริเริ่มที่ต้องการลดขนาดของเครื่องให้เล็กที่สุด แต่มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนสูง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัดรัดจะเรียกชื่อได้ก็ต่อเมื่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ถ่ายเทความร้อน (ในหน่วย ft^2) กับปริมาตร (ในหน่วย ft^3) ของเครื่องมีค่ามากกว่า 200 ขึ้นไป เพื่อให้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยมีค่าสูง ในกรณีที่ใช้ท่อกลมปกติจะใช้ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1/4 นิ้ว ร่วมกับครีบ (Fin) หรือแผ่นโครงร่างแสดงตัวอย่างทั่วไปของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระทัดรัด เนื่องจากโครงสร้างแบบนี้ซ่อมแซมทำความสะอาดได้ยาก และอุณหภูมิหรือความดันที่ใช้ก็มีจำกัด จึงไม่ค่อยใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมี แต่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีเลิศระหว่างก๊าซ 2 ชนิดที่สกปรกน้อย

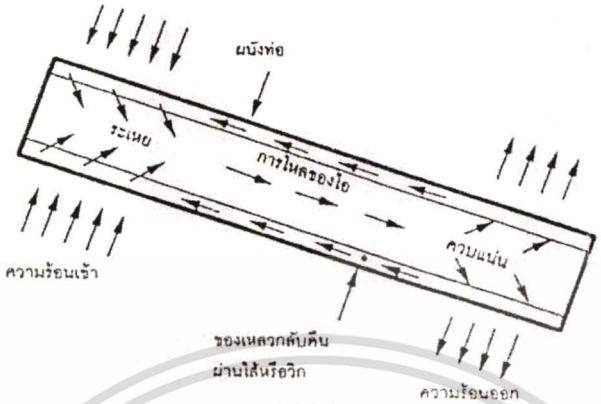
13. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแนวใหม่ที่มีอัตราการนำความร้อนสูง และมีสมรรถนะสูง แม้ว่าผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อน (heat source) และแหล่งรับความร้อน (heat sink) มีค่าน้อยกว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ประกอบด้วยฮีทไปป์ ซึ่งเป็นท่อปิดผนึก ภายในบรรจุวิกค์ (Wick) และของเหลวใช้งาน (Working Fluid) ที่ความดันสูญญากาศ

ลักษณะการทำงานของฮีทไปป์มีแสดงอยู่ในรูปที่ 4.5 กล่าวคือ เมื่อฮีทไปป์รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนผ่านผนังท่อของช่วงการระเหย (Evaporation Section) ไปยังวิกค์ ของเหลวใช้งานที่อยู่ในวิกค์จะระเหยกลายเป็นไอ ไอที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปตามท่อไปยังช่วงการควบแน่น (Condensation Section) ซึ่งมีความดันไอต่ำกว่า ณ ที่นี้ความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นจากการควบแน่นจะถ่ายเทผ่านผนังท่อไปสู่แหล่งรับความร้อน ส่วนของเหลวจากการควบแน่นจะไหลซึมกลับไปช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระเหยโดยแรงคาพิลลารี (Capillary Action) ของวิกค์ รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ฮีทไปป์เป็นตัวถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 4.5 ลักษณะการทำงานของฮีทไปป์

รูปที่ 4.6 โครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างของเหลวใช้งานกับอุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซนติเกรด)	ของเหลวใช้งาน
20-40	แอมโมเนีย
50-200	น้ำ
250-650	ปรอท
400-800	โปแตสเซียม
500-1000	โซเดียม
1000-1800	ลิเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ สำหรับกรณีของก๊าซร้อนและก๊าซเย็น

ประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ความดันที่สูญเสีย	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	การบำรุงรักษา	ราคา	พลังงานเสริม	การรั่วผสมของของไหล	พื้นที่การถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตร 1 หน่วย	คะแนนรวม
Regeneration	ปานกลาง 3	สูง 4	ยาก 2	สูง 2	จำเป็น	มี 0	มาก 4	15
Shell and Tube	สูง 2	สูง 4	ธรรมดา 3	ปานกลาง 3	ไม่จำเป็น	ไม่มี 5	น้อย 2	19
Plate fin	ต่ำ 4	ปานกลาง 3	ธรรมดา 3	สูง 2	ไม่จำเป็น	ไม่มี 5	มากพิเศษ 5	22
Recirculating	ต่ำ 4	ต่ำ 2	ยาก 2	สูง 2	จำเป็น	ไม่มี 5	มากพิเศษ 3	18
Secondary medium								
Heat-pipe	ต่ำ 4	สูง 4	ง่าย 5	ปานกลาง 3	ไม่จำเป็น	ไม่มี 5	มาก 4	25

จุดเด่นของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์มีดังต่อไปนี้

1. ไม่ต้องใช้แหล่งพลังงานเสริมในการใช้งาน ยกเว้นเครื่องเป่าลม หรือสูบของเหลว

2. อุณหภูมิที่ใช้งานมีช่วงกว้างและสามารถทำงานได้ แม้อุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อน และแหล่งรับความร้อนต่างกันไม่มาก ถ้าเลือกของเหลวใช้งานให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

3. อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยมีค่าสูงกว่าอัตราการนำความร้อนของโลหะ

4. ปัญหาในการใช้งานและการดูแลรักษามีน้อย เพราะไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว (Moving Parts)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆ เช่นในการรักษาอุณหภูมิในยานอวกาศให้มีค่าสม่ำเสมอทุกจุด, ในการกำจัดความร้อนออกจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิคประเภททรานซิสเตอร์ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและวงจรไอซี, ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนและก๊าซเย็นเพื่อประหยัดพลังงาน, ในการควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์, ใน

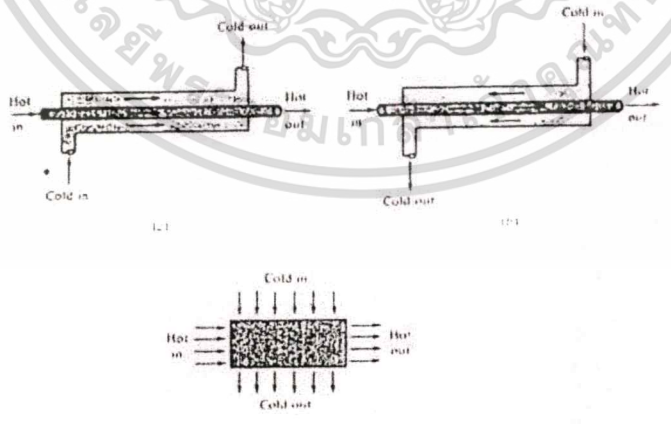
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอบแห้งเส้นใยและกระดาษ, ในการเก็บความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำ, ในการระบายความร้อนจากระบบเบรคของเครื่องบิน, เตาเผาขยะและกระบวนการผลิต เป็นต้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนและก๊าซเย็นในอดีตมีหลายประเภท การเปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่างสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ กับอุปกรณ์ประเภทอื่นๆ ทำได้ค่อนข้างลำบากก็จริง แต่ Basiulis ก็เคยลองทำการเปรียบเทียบโดยวิธีให้คะแนนหัวข้อเปรียบเทียบต่างๆ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

อย่างไรก็ดีถ้าการเลือกวัสดุและการออกแบบฮีทไปป์กระทำอย่างไม่ถูกต้องก็อาจเกิดปัญหาในการใช้งานได้ เช่น การผุทะลุของผนังท่อ จะทำให้ฮีทไปป์หมดประสิทธิภาพในการทำงานโดยสิ้นเชิง การผุกร่อนของผนังด้านในอาจก่อให้เกิดการอุดตัน หรือเสื่อมคุณภาพของวิกค์ได้บางครั้งวิกค์อาจเกิดการแห้งตัวได้ (Dry out) ถ้าแรงคาพิลลารีมีไม่เพียงพอที่จะถ่ายเทความร้อนของของเหลวควบแน่นกลับไปช่วงการระเหยได้ทัน ของเหลวใช้งานก็อาจเสื่อมคุณภาพได้ที่อุณหภูมิสูงเกินไป

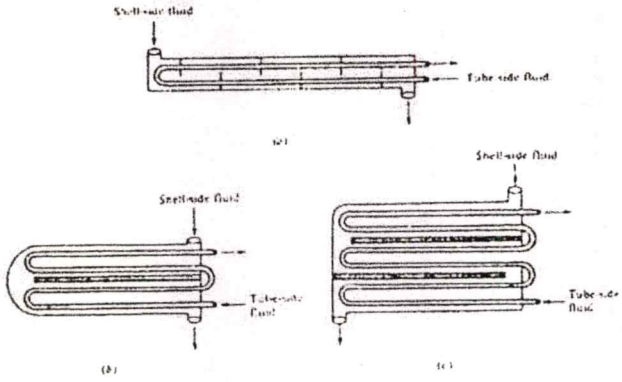
4.1.4 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตาม Flow Arrangement

1. Parallel flow การไหลจะเป็นการไหลแบบทางเดียวกัน ดังรูปที่ 4.7 (a)
2. Counter flow จะเป็นการไหลแบบสวนทางกัน ดังรูปที่ 4.7 (b)
3. Cross flow จะเป็นการไหลแบบตัดขวาง ดังรูปที่ 4.7 (c)
4. Multi pass นิยมใช้ในการเพิ่มการทำ Heat Exchanger เพราะว่าการเพิ่ม Multipassing จะทำให้ overall effectiveness over individual effectiveness ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 (a) การไหลขนานกัน (b) การไหลสวนทางกัน (c) การไหลตัดขวางกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 การไหลแบบ Multipass (a) one shell pass, two tube pass (b) two shell pass, four tube pass (c) three shell pass, six tube pass

4.1.5 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตาม Transfer Process

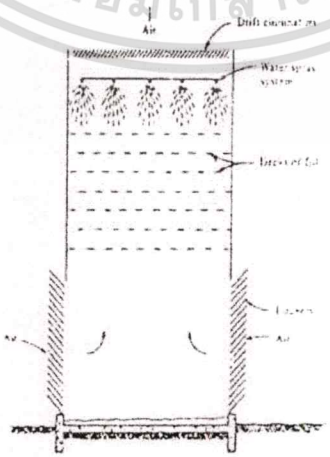
1. Direct Contact การถ่ายเทความร้อนจะเป็นการถ่ายเทระหว่าง Inmiscible Fluids เช่น Cooling Tower สำหรับส่วนในของ Cooling Towers จะใช้ความร้อนมาจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Process) โดยนำความร้อนที่เกิดขึ้นส่งไปที่น้ำ เช่น River lake ocean โดยจะแบ่งเป็นการพาความร้อน 2 แบบ คือ

1.1 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection)

1.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection)

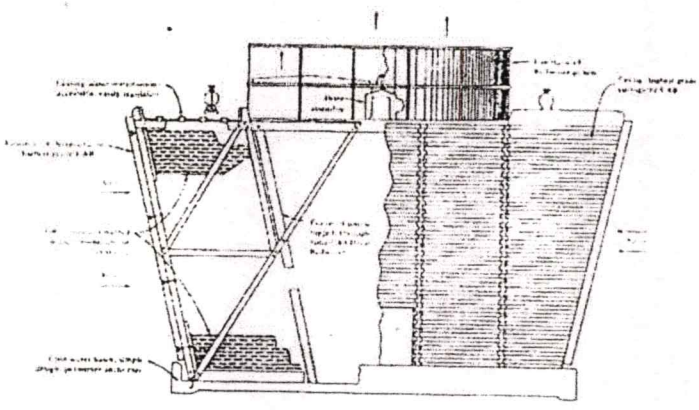
สำหรับ Cooling Towers แบบ Natural Convection เป็นตามรูปที่ 4.9 โดยจะมีการพ่นน้ำ (sprayed water) จากทางด้านบนลงมาด้านล่าง โดยมีความร้อนขึ้นด้านบน สำหรับ Cooling Tower แบบ Forced Convection เป็นไปตามรูปแบบ 4.10

2. Indirect Contact จะเป็นพวกหม้อน้ำรถยนต์ (Automobile Radiators)



รูปที่ 4.9 แสดง Cooling Towers แบบ Natural Convection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดง Cooling Towers แบบ Forced Convection

4.1.6 ลักษณะการแบ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตาม Compactness

เป็นการแบ่งวัดตามอัตราส่วนของ Heat transfer surface one area ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ต่อปริมาตรของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หากมีค่ามากกว่า 700 m^2/m^3 จะเรียกว่าเป็น Compact heat exchanger ยกตัวอย่างก็จะเป็นพวก Automobile radiator จะมี Area Density ประมาณ 1,100 m^2/m^3 สำหรับ Vehicular gas turbine จะมี Area Density ประมาณ 6,000 m^2/m^3 เป็น Compact Heat Exchanger สำหรับปอดของมนุษย์ (Human lungs) จะมี Area Density ประมาณ 20,000 m^2/m^3 เป็นต้น จะถือว่าเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีค่า Compact Heat Exchanger สูงสุด สำหรับ Stirling engine เป็น Area Density เข้าใกล้ปอดของมนุษย์ (Human lungs) สำหรับ Plane tubular และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Shell and tube exchanger) ที่มี Area Density ในช่วง 70 ถึง 500 m^2/m^3 จะไม่คิดว่าเป็น Considered Compact สำหรับการทำให้ Ratio มีค่าสูงทำได้โดยการติดครีบ (fins) ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สไปที่ของเหลว (Gas to Liquid) Heat transfer coefficient ของทางด้านแก๊ส (Gas) น้อยกว่าทางด้าน (Liquid) จะต้องมีการติดครีบ (fin) ทางด้านแก๊ส (Gas) เพื่อจะให้มีความกระทัดรัดมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
วัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

5.1 วัสดุที่ใช้ในการทำ Heat Exchanger

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ แทบทั้งหมดทำจากโลหะแทบทั้งสิ้น โลหะเป็นวัสดุที่มีให้เลือกใช้อย่างกว้างขวาง พร้อมลักษณะสมบัติความแข็งแรงที่หลากหลาย โลหะสามารถแต่งขึ้นรูปได้สะดวกและสามารถเชื่อมต่อได้โดยการเชื่อมหรือการบัดกรี ปัจจัยทางด้านเศรษฐกิจเป็นตัวชี้นำให้ใช้โลหะที่มีราคาต่ำสุดที่ยังสามารถทนต่อการไหลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ ความสามารถในการทนต่อการไหลที่สำคัญคือ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหลวและไอที่กัดกร่อน เช่น กรดไฮดรอคลอริก กรดกำมะถัน และกรดฟอสฟอริก เป็นเหตุให้ต้องหันไปใช้โลหะที่มีราคาแพง เช่น ไททาเนียม แทนทาลัม เซอร์โคเนียม และแฮสเทอลอย ตลอดจนโลหะผสมอื่นๆ ของไหลบางชนิดมีความกัดกร่อนมากจนไม่สามารถหาโลหะที่มีความเหมาะสมในเชิงความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ ภายใต้ข้อจำกัดทางเศรษฐศาสตร์ ทางเลือกก็คือใช้โลหะที่ไม่ใช่โลหะ เช่น พลาสติก แกร์ไฟต์ แก้ว เป็นต้น

5.1.1 พลาสติก

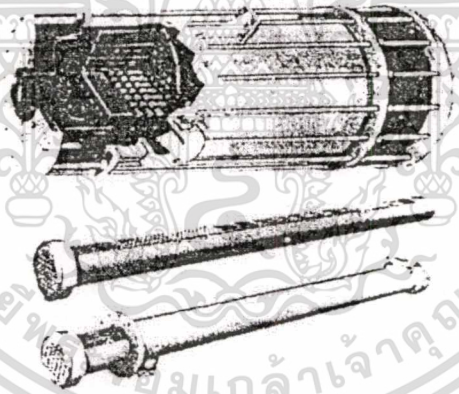
วัสดุพลาสติกโดยเฉพาะอย่างยิ่ง Teflon หรือ Fluon (Polyterafliooroethylene, PTFE) ได้รับความนิยมเป็นพิเศษเนื่องจากสมบัติที่ดีเยี่ยมในด้านความต้านทานต่อการทำลายทางเคมี และการเสื่อมสภาพ เราสามารถสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงได้โดยการใช้กลุ่มท่อ PTFE ที่ยาวบางและยืดหยุ่น ซึ่งปลายท่อถูกยึดเข้ากับท่อพักที่ทำด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน กลุ่มท่อนี้จะถูกม้วนหรือแขวนอยู่ในถังระบายความร้อนที่เปิดบรรจุน้ำระบายความร้อน อีกเทคนิคหนึ่งเป็นการชุบ PTFE บนพื้นผิวภายในท่อและพื้นผิวอื่นๆ ที่สัมผัสกับของไหลที่กัดกร่อน

5.1.2 แกร์ไฟต์

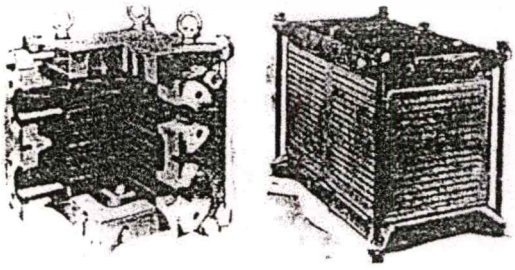
แกร์ไฟต์เป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางเช่นกัน ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับของไหลที่กัดกร่อนมาก แกร์ไฟต์มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูงมาก เป็นตัวนำความร้อนที่ดี และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ (นั่นคือทนต่อการกระโชกทางความร้อน) แกร์ไฟต์สามารถรับการกัดกลึงทางกลได้ดี แต่ไม่สามารถเชื่อมได้และมีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ ในการออกแบบจึงมุ่งให้แกร์ไฟต์ทำงานภายใต้แรงกด ขีดจำกัดทางด้านอุณหภูมิและความดันสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แกร์ไฟต์โดยทั่วไปคือ 175 °C และ 1.7 MPa ตามลำดับ การใช้แกร์ไฟต์เป็นวัสดุทางวิศวกรรมนับว่ามีประวัติอันยาวนาน แต่ได้ขยายขอบเขตการใช้งานใน

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางเมื่อไม่กี่สิบปีมานี้ อันเป็นผลจากการพัฒนาเทคนิคทำให้แกร์ไฟต์ไม่เป็นรูพรุน โดยการทำให้อิ่มตัวภายใต้ความดันโดยเรซินที่เหมาะสม การขยายขอบเขตการใช้งานนี้พอดีพ้องกับการขยายตัวโดยทั่วไปทางอุตสาหกรรมทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับตัวประกอบอินทรีย์ของคลอรีนและฟลูออรีน ปัญหาจากการที่แกร์ไฟต์มีความแข็งแรงต้านทานแรงดึงต่ำ สามารถแก้ได้โดยการออกแบบให้ชิ้นส่วนที่เป็นแกร์ไฟต์ทำงานอยู่ภายใต้ความเค้นกดแทนที่จะเป็นความเค้นดึง วิธีหนึ่งก็คือการหุ้มแกร์ไฟต์ด้วยเปลือกโลหะ ชิ้นส่วนแกร์ไฟต์ที่ประกอบเข้าด้วยกันค่อนข้างแน่น จะถูกประกอบที่อุณหภูมิสูงเพื่อว่าเมื่อเย็นตัวลงโลหะจะเกิดการหดตัวและบีบแกร์ไฟต์ให้อยู่ภายใต้แรงกด สำหรับการใช้งานที่ความดันสูงมักจะนำเอาเทคนิครูไขว้ ซึ่งจะทำการเจาะรูเป็นแถวขนานกันในแท่งแกร์ไฟต์ตัน รูที่เจาะจะมีด้วยกันสองชุดที่ทำมุมฉากกันและอาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน ชุดที่หนึ่งสำหรับของไหลที่กัดกร่อนทางด้านท่อ ส่วนอีกชุดหนึ่งสำหรับของไหลที่ไม่กัดกร่อนทางด้านเชลล์ รูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้เทคนิคดังกล่าว แม้ว่าแกร์ไฟต์จะสามารถต้านทานการกัดกร่อนโดยการไหลส่วนใหญ่ได้ แต่ก็ไม่แนะนำให้ใช้กับสารละลายของโบรไมน์ ฟลูออไรน์ ฟอสฟอรัสแดง สารละลายชุบโครเมียม กรดไนตริก และกรดโคมิก หากมีข้อสงสัยควรปรึกษาผู้ผลิตแกร์ไฟต์โดยตรง

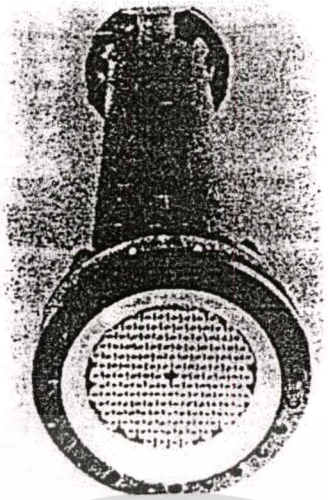


รูปที่ 5.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเชลล์ที่สร้างโดยใช้เทคนิครูไขว้

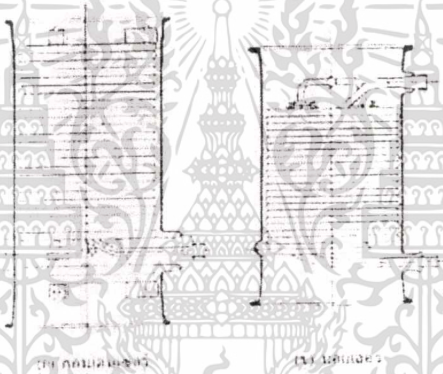


รูปที่ 5.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสี่เหลี่ยมที่ทำด้วยแกรไฟต์โดยใช้เทคนิครูไขว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเชลล์ที่ทำด้วยแก้วโดยมีเทฟลอนเป็นแผ่นยึดท่อและซีล



รูปที่ 5.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแก้ว

5.1.3 แก้ว

แก้วเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่ง ที่มีการนำมาใช้ทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในงานพิเศษเฉพาะอย่าง แก้วเป็นวัสดุที่น่าสนใจเป็นพิเศษสำหรับการใช้งานที่กัดกร่อนอื่นๆ แก้วมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง โดยนอกจากนี้แก้วยังได้รับความนิยมสูงในอุตสาหกรรมยาและอาหาร ซึ่งมีความสะอาดและความบริสุทธิ์ถือเป็นหัวใจสำคัญ ถ้าวัสดุของกระบวนการผลิตสัมผัสเฉพาะกับแก้วและเทฟลอนเท่านั้นโอกาสเกิดการปนเปื้อนจะน้อยมาก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำด้วยแก้วโดยทั่วไปมีโครงสร้างสองแบบ ดังที่แสดงในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 รูปที่ 5.3 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเชลล์ ตามปกติทั่วไปที่ใช้ท่อซึ่งทำด้วยแก้วและใช้แผ่นยึดท่อและซีลที่ทำเทฟลอน ตัวเชลล์อาจจะทำด้วยแก้วถ้าของไหลทั้งทางด้านเชลล์และด้านท่อที่เป็นของไหลที่กัดกร่อน ในกรณีความดันและอุณหภูมิการใช้งานถูกจำกัดไว้ที่ประมาณ 140 kPa และ 175 °C ตามลำดับ หากต้องการให้ทำงานที่ความดันและอุณหภูมิสูงกว่านี้ จะต้องใช้เชลล์ที่ทำด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งได้รับการฉาบหรือปิดหน้าด้วยเทฟลอนหรือยาง รูปที่ 5.4 แสดงขดท่อคอนเดนเซอร์และขดท่อบอยเลอร์ที่เป็นแก้ว ในกรณีแรกน้ำหล่อเย็นจะไหลเวียนอยู่ภายในขดท่อ ส่วนในกรณีหลังไอน้ำหรือของไหลชนิดอื่นจะอยู่ในท่อ ในการใช้งานอาจมีขดท่อหลายชุดวางซ้อนกันในแนวดิ่งก็ได้ เนื่องจากแก้วมีค่าสภาพการนำความร้อนต่ำมากเมื่อเทียบกับโลหะ จึงดูเหมือนว่าเป็นวัสดุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเลย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในทุกๆ แง่แล้วข้อเสียในส่วนนี้ของแก้วอาจไม่ร้ายแรงอย่างที่คิดแต่แรกก็เป็นได้ ปัจจัยก็คือพื้นผิวที่เรียบของแก้วจะช่วยลดทอนการเกิดคราบสกปรกอย่างได้ผลในหลายๆกรณี ความต้านทานทางด้านเฟาลิงเป็นตัวต้านทานความร้อนที่มีอิทธิพลที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วความต้านทานจากท่อมีค่าน้อยมาก ถึงแม้ว่าแก้วคงจะไม่มีโอกาสที่จะกลายเป็นวัสดุทางการถ่ายเทความร้อนที่ใช้กันอย่างกว้างขวางแต่ด้วยคุณสมบัติที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม ไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนและป้องกันการซึมผ่านได้ดี ประกอบกับมีให้เหลือใช้ได้หลายรูปแบบในราคาที่ต่ำ จึงทำให้ยังคงมีการใช้งานต่อไปในขบวนการหลายอย่างโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยา อาหาร เครื่องดื่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
ทฤษฎี

การไหลภายในท่อมีขอบเขตจำกัด โดยที่ความหนาของบาวน์ดารีเลเยอร์ไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เพราะว่าเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งบาวน์ดารีเลเยอร์ก็ก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อจึงไม่สามารถขยายออกไปได้อีก รูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ซึ่งการไหลลักษณะเช่นนี้เรียกว่าการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed flow) ส่วนการไหลก่อนหน้านี้เรียกว่าการไหลที่กำลังปรับตัว (developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region

6.1 กลศาสตร์ของไหล

ตัวพารามิเตอร์ความดันลดเกี่ยวข้องกับกำลังงานของพัดลมโดยตรง ยิ่งความดันลดมากจำเป็นต้องใช้กำลังขับเคลื่อนของไหลมาก

การจ่ายกำลังให้พัดลม, $\dot{W}_{in}$

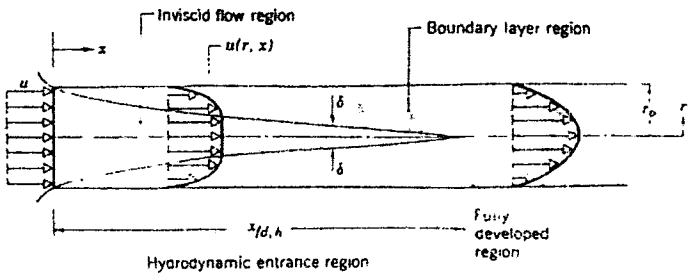
$$\dot{W}_{in} = Q\Delta p \tag{6.1}$$

ความดันลดของของไหล, Δp

$$\Delta p = f\frac{\rho L \bar{V}^2}{2D} \tag{6.2}$$

6.1.1 สภาวะการไหล

พิจารณาการไหลแบบลามินาร์ในท่อกลมที่มีรัศมี r_o ตามรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 การก่อตัวของบาวน์ดารีเลเยอร์ของการไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการไหลภายในท่อนั้น ต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นอย่างไร แบบลามินาร์หรือเทอร์บูเลนท์

เรย์โนลด์นัมเบอร์, Re_D

$$\mathrm{Re}_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} \tag{6.3}$$

เมื่อ u_m คือ ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

เรย์โนลด์นัมเบอร์วิกฤติ สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากลามินาร์เป็นเทอร์บูเลนท์ เริ่มต้นจาก $\mathrm{Re}_{D,c} \approx 2300$ และการไหลเป็นแบบเทอร์บูเลนท์เต็มที่ ที่ $\mathrm{Re}_D \geq 4000$

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ ($\mathrm{Re}_D \leq 2300$) ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัว หาได้จากสมการ

$$\left(\frac{x_{fd,h}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05\,\mathrm{Re}_D \tag{6.4}$$

ส่วนในการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ($\mathrm{Re}_D \geq 4000$) ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ และมีค่าประมาณดังนี้

$$10 \leq \left(\frac{x_{fd,h}}{D}\right)_{turb} \leq 60 \tag{6.5}$$

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

6.1.2 ความเร็วเฉลี่ย (mean velocity)

ความเร็วภายในท่อจะแปรเปลี่ยนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังนั้นจึงใช้ความเร็วเฉลี่ย u_m (mean velocity) แทน โดยนิยามว่าความเร็วเฉลี่ยคือ ความเร็วคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อและความหนาแน่นของของไหล จะเท่ากับอัตราการไหลของมวล

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \tag{6.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเป็นการไหลสภาวะคงที่ ที่อัดตัวไม่ได้ภายในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ค่า m และ u_m ย่อมมีค่าคงที่ตลอดความยาวท่อ

สำหรับท่อกลม $\left(A_c = \pi D^2/4\right)$ ค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์ลดลงเป็น

$$\mathrm{Re}_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D\mu} \tag{6.7}$$

เพราะว่าค่า $\dot{m}$ อาจหาได้จากการอินทิเกรตของฟลักซ์มวล (ρu) ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho u(r,x)\,dA_c \tag{6.8}$$

ดังนั้นสำหรับท่อกลม กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ จะได้

$$u_m = \frac{\int_{A_c} \rho u(r,x)\,dA_c}{\rho A_c} = \frac{2\pi\rho}{\rho\pi r_o^2}\int_0^{r_o} u(r,x)\,dr = \frac{2}{r_o^2}\int_0^{r_o} u(r,x)\,dr \tag{6.9}$$

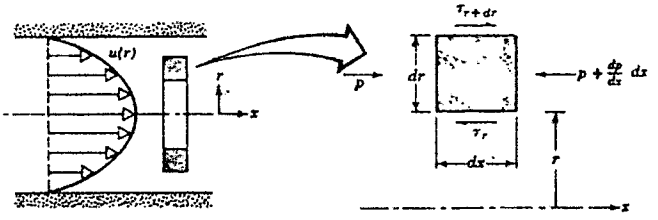
ซึ่งจะหาค่า u_m ได้ทันที เมื่อรู้ velocity profile, $u(r)$ ที่ตำแหน่งนั้น

6.1.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

รูปทรงของความเร็วสามารถหาได้ สำหรับการไหลแบบลามินาร์ของของไหลที่คุณสมบัติคงที่ อัดตัวไม่ได้ ในช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้วของท่อกลม (สำหรับเทอร์บูเลนท์ ส่วนใหญ่ต้องอาศัยผลจากการทดลองเป็นหลัก) โดยทั่วไปจะเป็นฟังก์ชั่นของรัศมี

สิ่งสำคัญสำหรับเงื่อนไขข้างต้นก็คือ ค่าความเร็วในแนวรัศมีและการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกนทุกๆ แห่งมีค่าเป็นศูนย์ $v = 0$ และ $(\partial u/\partial x) = 0$ ดังนั้นความเร็วตามแนวแกนจะมีค่าขึ้นอยู่กับ r เท่านั้น $[u(x,r) = u(r)]$

ความเร็วตามแนวแกนหาได้จากการแก้สมการที่เหมาะสมของสมการโมเมนตัมตามแนว x หรือหาโดยคิดสมดุลของการอนุรักษ์โมเมนตัมก็ได้ตามรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 สมดุลแรงบนอิลิเมนท์ dx สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ก่อตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอิลิเมนท์ดิฟเฟอเรนเชียลรูปวงแหวนของรูปที่ 6.2 สามารถเขียนสมดุลของแรงได้ดังนี้

$$-\tau_r(2\pi r dx)+\left\{\tau_r(2\pi r dx)+\frac{d}{dr}[\tau_r(2\pi r dx)]dr\right\}$$
$$+p(2\pi r dr)-\left\{p(2\pi r dr)+\frac{d}{dx}[p(2\pi r dr)]dx\right\}=0 \qquad (6.10)$$

ซึ่งลดรูปเป็น $$-\frac{d}{dr}(r\tau_r)=r\frac{dp}{dx} \qquad (6.11)$$

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

ดังนั้น (6.11) จะเป็น $$\frac{\mu}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{du}{dr}\right)=\frac{dp}{dx} \qquad (6.12)$$

เพราะว่า dp/dx นั้นไม่ขึ้นกับ r ดังนั้นเราสามารถอินทิเกรต (6.12) ได้

$$r\frac{du}{dr}=\frac{1}{\mu}\left(\frac{dp}{dx}\right)\frac{r^2}{2}+C_1 \qquad (6.13)$$

และ $$u(r)=\frac{1}{\mu}\left(\frac{dp}{dx}\right)\frac{r^2}{4}+C_1\ln r+C_2 \qquad (6.14)$$

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

$$u(r)=-\frac{1}{4\mu}\left(\frac{dp}{dx}\right)r_o^2\left[1-\left(\frac{r}{r_o}\right)^2\right] \qquad (6.15)$$

ดังนั้นรูปทรงของความเร็วสำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว จะเป็นพาราโบลา และจะสังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน (dp/dx) ต้องเป็นลบเสมอ

ผลลัพธ์ที่กล่าวมานี้อาจใช้หาค่าความเร็วเฉลี่ยได้ (u_m) โดยแทนสมการ (6.15) ใน (6.9) แล้วอินทิเกรต จะได้

$$u_m=-\frac{r_o^2}{8\mu}\frac{dp}{dx} \qquad (6.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (6.16) ใน (6.15) จะได้รูปร่างของความเร็วเป็น

$$\frac{u(r)}{u_m} = 2\left[1-\left(\frac{r}{r_o}\right)^2\right] \tag{6.17}$$

เพราะว่า u_m สามารถหาได้จากการรู้อัตราการไหลของมวล ดังนั้นสมการ (6.16) สามารถใช้หาเกร์เดียนของความดันได้ (dp/dx)

6.1.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว

ปกติวิศวกรมักสนใจเกี่ยวกับความดันลดในการไหลภายในท่อ เนื่องจากตัวพารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับการหาขนาดกำลังงานของปั๊มหรือพัดลมโดยตรง ในการหาความดันลดเราจะใช้ตัวประกอบเสียดทานของ Moody (Darcy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยนิยามว่า

$$f = \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2/2} \tag{6.18}$$

ค่านี้ต่างกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน C_f ซึ่งบางครั้งเรียกว่าตัวประกอบเสียดทานเฟนนิ่ง ซึ่งนิยามว่า

$$C_f = \frac{\tau_s}{\rho u_m^2/2} \tag{6.19}$$

เพราะว่าแรงเฉือนบนผิวของของไหลเท่ากับทิศทางตรงกันข้ามแรงบนผิวของของไหล ดังนั้นความเค้นเฉือนบนผิวกำหนดเป็น $\tau_s = -\mu(du/dr)\big|_{r=r_0}$ ได้

$$C_f = \frac{f}{4} \tag{6.20}$$

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}_D} \tag{6.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว การวิเคราะห์ยุ่งยากมากกว่าต้องใช้ผลจากการทดลองตัวประกอบเสียดทานสำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ได้แสดงในไดอะแกรมของ Moody ในรูปที่ 6.2 ตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าขึ้นอยู่กับเรย์โนลด์นัมเบอร์และสภาวะผิวของท่อ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับผิวเรียบและเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหยาบของผิว (e) เพิ่มขึ้น โดยประมาณดังนี้

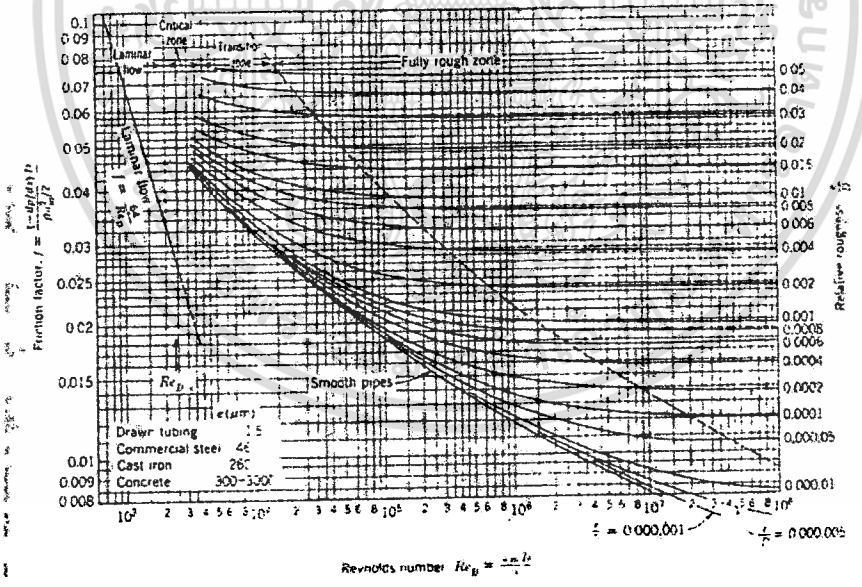
$$f = 0.316\,\mathrm{Re}_D^{-1/4} \qquad \mathrm{Re}_D < 2\times10^4 \tag{6.22}$$

$$f = 0.184\,\mathrm{Re}_D^{1/5} \qquad \mathrm{Re}_D > 2\times10^4 \tag{6.23}$$

นอกจากนี้เรารู้ว่าความดันลด (Δp) ระหว่างระยะ x_1 ถึง x_2 เป็น

$$\Delta p = -\int_{p_1}^{p_2} dp = f\frac{\rho u_m^2}{2D}\int_{x_1}^{x_2} dx = f\frac{\rho u_m^2}{2D}(x_2 - x_1) \tag{6.24}$$

ซึ่งค่า f หาจากรูปที่ 6.3 หรือจากสมการ (6.21) สำหรับการไหลแบบลามินาร์ และจากสมการ (6.22) และ (6.23) สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ในท่อกลมผิวเรียบ



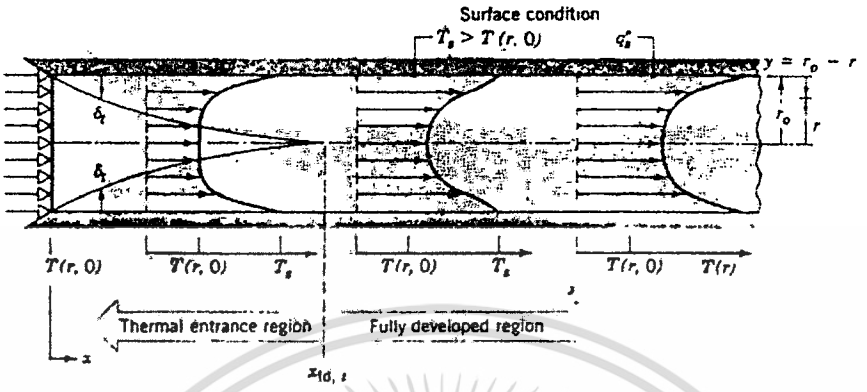
รูปที่ 6.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม

6.2 การถ่ายเทความร้อน

ถ้าของไหลไหลเข้าไปในท่อตามรูปที่ 6.4 ที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ $T(r,0)$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและบาวน์ดารีเลเยอร์ของความร้อนจะเริ่มต้นก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่ โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอคงที่ (T_s = คงที่) หรือ

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ (q_s'' = คงที่) สภาวะที่ปรับตัวคงที่แล้วของความร้อน (thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น ในที่สุดรูปร่างของอุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะแตกต่างกันตามเงื่อนไขไม่ว่าอุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่



รูปที่ 6.4 การก่อตัวของบาวน์ดารีทางความร้อนในท่อกลม

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ ระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัว

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05\,\mathrm{Re}_D\,\mathrm{Pr} \tag{6.25}$$

โดยการเปรียบเทียบบริเวณทางเข้า (entrance region) ของอุณหภูมิตามสมการ (6.25) กับสมการของความเร็ว (6.4) จะพบว่าต่างกันที่ค่า Pr เท่านั้น จึงพอสรุปได้ว่า ถ้า $\mathrm{Pr} > 1$ แล้ว ไฮโดรไดนามิคบาวน์ดารีเลเยอร์ขยายเร็วกว่าบาวน์ดารีเลเยอร์ของความร้อนมาก ($x_{fd} > x_{fdt}$) และจะกลับกันถ้า $\mathrm{Pr} < 1$ สำหรับค่า Pr สูงๆ เช่น น้ำมัน ($\mathrm{Pr} \geq 100$) x_{fd} จะน้อยกว่า x_{fdt} มาก และอาจสมมุติได้ว่ารูปทรงของความเร็วที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว มีตลอดช่วงบริเวณทางเข้าของความร้อน ในทางกลับกันของไหลที่มีค่า Pr ต่ำมากๆ เช่น โลหะเหลว ($\mathrm{Pr} \leq 0.05$) รูปร่างอุณหภูมิอาจเป็นแบบปรับตัวเต็มที่แล้วได้เร็วมาก ในขณะที่รูปร่างของความเร็วยังอยู่ในช่วงกำลังก่อตัวอยู่ ส่วนในการไหลแบบเทอร์บูเลนท์เงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ Pr และโดยการประมาณได้ว่า $x_{fdt}/D = 10$

6.2.1 อุณหภูมิเฉลี่ย

ในเรื่องอุณหภูมิ จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) โดยให้ความหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho u c_v T dA_c}{\dot{m} c_v} \tag{6.26}$$

สำหรับท่อกลม และเป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้

$$T_m = \frac{2}{u_m r_o^2} \int_0^{r_o} uTrdr \tag{6.27}$$

ค่าของ T_m จะเปลี่ยนตามแนว x ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหล ซึ่งต่างจาก u_m มีค่าคงที่ สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

ฟลักซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \tag{6.28}$$

ซึ่ง h เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใดๆ T_m เปลี่ยนแปลงตามทิศทาง นั่นคือ dT_m/dx จะไม่เป็นศูนย์ ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น

6.2.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed conditions)

เนื่องจากมีการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของไหลยังคงเปลี่ยนแปลงตามระยะ x สิ่งหนึ่งที่อยากรู้คือเกิดภาวะ Thermal fully developed หรือยัง สถานการณ์นี้จะแตกต่างไปจากกรณีการไหลของของไหลที่ $(\partial u/\partial x)=0$ ในช่วงบริเวณปรับตัวเต็มที่แล้ว ในทางกลับกัน ถ้ามีการพาความร้อนแล้ว (dT_m/dx) เช่นเดียวกับ $(\partial T/\partial x)$ ที่รัศมี r ใดๆ จะไม่เป็นศูนย์ ผลที่ตามมาก็คือรูปร่างของอุณหภูมิ $T(r)$ จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ x ซึ่งเปรียบเสมือนว่า สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิเพื่อให้ได้เงื่อนไขนี้

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

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{T_s(x) - T(r,x)}{T_s(x) - T_m(x)}\right]_{fd,t} = 0 \tag{6.29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิผิวท่อ

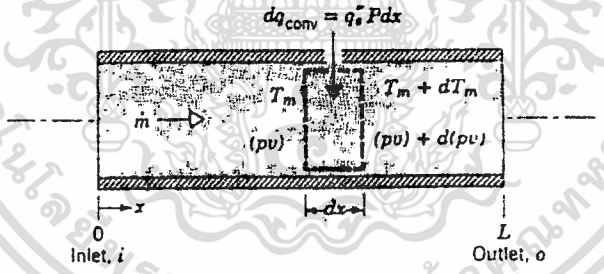
T คือ อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (6.29) ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่อ อาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่ หรือ T_s คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่นในผนังท่อที่ได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอ จะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนกรณี T_s คงที่ จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสภาวะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

6.3 การสมดุลของพลังงาน (Energy Balance)

พิจารณาการไหลในท่อตามรูปที่ 6.5 ของไหลไหลด้วยอัตรามวลคงที่ $\dot{m}$ และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของของไหล รวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางตามแนวแกนจะไม่นำมาคิด ดังนั้นถ้าไม่มีงานเพลาซึ่งกระทำโดยของไหลขณะไหลผ่านท่อแล้ว จะมีเพียงอิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและงานจากการไหลเท่านั้น



รูปที่ 6.5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ

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

โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 6.5 และจากนิยามของ T_m จะได้

$$dq_{conv} + \dot{m}(c_v T_m + pv) - \left[\dot{m}(c_v T_m + pv) + \dot{m}\frac{d(c_v T_m + pv)}{dx}dx\right] = 0 \qquad (6.30)$$

หรือ $$dq_{conv} = \dot{m}d(c_v T_m + pv) \qquad (6.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$dq_{conv} = \dot{m} c_p dT_m \tag{6.32}$$

สมการนี้ใช้ได้ดีสำหรับของเหลวที่อัดตัวไม่ได้เช่นกัน ในกรณีนี้ $c_v = c_p$ เพราะว่า v น้อยมากๆ $d(pv)$ โดยทั่วไปจะน้อยกว่า $d(c_v T_m)$ มากจนตัดทิ้งได้

รูปของสมการ (6.32) เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขสำหรับท่อทั้งหมด โดยการอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อ จะได้

$$q_{conv} = \dot{m} c_p \left(T_{m,o} - T_{m,i}\right) \tag{6.33}$$

โดยที่ q_{conv} เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h

$$h = \frac{\dot{m} C_p \left(T_{m,o} - T_{m,i}\right)}{A_s \left(T_s - T_b\right)} \tag{6.34}$$

อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, T_b

$$T_b = \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \tag{6.35}$$

นัสเซิลล์นัมเบอร์, Nu_D

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \tag{6.36}$$

เงื่อนไขความร้อนที่ผิวคือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Surface Heat Flux) โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ที่ผิวครีบ

6.4 สหพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม

6.4.1 ช่วงบริเวณที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed region)

ที่จุดใดๆ ในท่อ สมการพลังงานจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial r}=\frac{\alpha}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{6.37}$$

เทอมทางซ้ายมือของสมการ (6.37) เป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการพา และเทอมทางขวามือเป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการนำ ในทิศทางตามแนวรัศมี

คำตอบของสมการ (6.37) ได้หาไว้แล้วสำหรับช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ในช่วงนี้การประมาณบาวน์ดารีเลเยอร์ของความเร็วเป็นที่พอใจ นั่นคือ $v=0$ และ $(\partial u/\partial x)=0$ สำหรับกรณีของรูปร่างความเร็วตามแนวแกนเป็นแบบพาราโบลา นอกจากนี้สำหรับกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่การประมาณบาวน์ดารีเลเยอร์ของอุณหภูมิให้ผลที่เป็นที่พอใจเช่นกัน นั่นคือ $\partial^2T/\partial x^2=0$ แทนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามแนวแกนและความเร็วตามแนวแกน สมการพลังงาน (6.37) ลดรูปเป็น

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\frac{(rdT)}{dr}=\frac{2u_m}{\alpha}\frac{(dT_m)}{dx}\left[1-(r/r_o)^2\right] \qquad q_s''=\text{คงที่} \tag{6.38}$$

ซึ่งเทอม $(2u_m/\alpha)(dT_m/dx)$ คงที่ โดยการแยกตัวแปรและอินทิเกรต 2 ครั้ง จะได้

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

ค่าคงที่ของการอินทิเกรต C_1 และ C_2 หาจากเงื่อนไขที่ขอบดังนี้

T ที่ $r=0$ หรือ $(\partial T/\partial r=0$ ที่ $r=0)$ จะได้ $C_1=0$ และ $T(r_o)=T_s$ ที่ซึ่ง T_s แปรตาม x จะได้ $C_2=T_s-(2u_m/\alpha)(dT_m/dx)(3r_o^2/16)$ ดังนั้นสำหรับช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้วและฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่จะได้การกระจายของอุณหภูมิในรูป

$$T(r)=T_s-\frac{2u_mr_o^2}{\alpha}\left(\frac{dT_m}{dx}\right)\left[\frac{3}{16}+\frac{1}{16}\left(\frac{r}{r_o}\right)^4-\frac{1}{4}\left(\frac{r}{r_o}\right)^2\right] \tag{6.39}$$

เมื่อรู้การกระจายของอุณหภูมิ ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ก็สามารถหาได้ เช่นถ้ารู้รูปร่างของความเร็วและอุณหภูมิตามสมการ (6.15) และ (6.39) โดยแทนในสมการ (6.27) และอินทิเกรตทั่วทั้ง r จะได้

$$T_m=T_s-\frac{11}{48}\left(\frac{u_mr_o^2}{\alpha}\right)\left(\frac{dT_m}{dx}\right) \tag{6.40}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$T_m - T_s = -\frac{11}{48}\frac{q_s'' D}{k} \tag{6.41}$$

จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน สมการ (6.28) และ (6.41) ได้ว่า

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

หรือ $$Nu_D = \frac{hD}{k} = 4.36$$ สำหรับ q_s'' คงที่ (6.42)

ดังนั้นในท่อกลมที่มีคุณลักษณะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ การไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ค่านัสเซิลท์นัมเบอร์จะคงที่ ไม่ขึ้นกับ Re_D, Pr และตำแหน่งตามแนวแกน x

6.5 สหพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบเทอร์บูเลนท์ในท่อกลม

สมการหา Nu_x สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลมเรียบเสนอโดย Colburn ซึ่งได้มาจาก Chilton-Colburn analogy

$$\frac{C_f}{2} = \frac{f}{8} = St\,\mathrm{Pr}^{2/3} = \frac{Nu_D}{\mathrm{Re}_D\,\mathrm{Pr}}\mathrm{Pr}^{2/3} \tag{6.43}$$

แทน f จากสมการ (6.23) สมการของ Colburn เป็น

$$Nu_D = 0.023\,\mathrm{Re}_D^{4/5}\,\mathrm{Pr}^{1/3} \tag{6.44}$$

Dittus-Boelter ได้เสนอสมการเป็น

$$Nu_D = 0.023\,\mathrm{Re}_D^{4/5}\,\mathrm{Pr}^{n} \tag{6.45}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สมการนี้ได้รับการยืนยันจากผลการทดลองสำหรับช่วงของเงื่อนไขดังนี้

$$\begin{bmatrix} 0.7 \le \mathrm{Pr} \le 160 \\ \mathrm{Re}_D \ge 10{,}000 \\ L/D \ge 10 \end{bmatrix}$$

สมการต่างๆ นี้จะใช้เพียงเฉพาะกรณีย่อยๆ ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ $(T_s - T_m)$ ไม่มากนัก โดยคุณสมบัติต่างๆ คิดที่ T_m สำหรับการไหลที่แสดงลักษณะการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติมากๆ Seider และ Tate ได้แนะนำให้ใช้สมการต่อไปนี้

$$Nu_D = 0.027\,\mathrm{Re}_D^{4/5}\,\mathrm{Pr}^{1/3}\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \tag{6.46}$$

สำหรับ $\begin{bmatrix} 0.7 \le \mathrm{Pr} \le 16{,}700 \\ \mathrm{Re}_D \ge 10{,}000 \\ L/D \ge 10 \end{bmatrix}$

โดยที่คุณสมบัติต่างๆ ยกเว้นค่า μ_s หาที่ T_m โดยที่ μ_s หาที่ T_s

6.6 สหพันธ์การพาความร้อน ท่อที่ไม่กลม

ถึงแม้ว่ามีข้อจำกัดมากเกี่ยวกับการพิจารณาต่อการไหลภายในท่อกลม การประยุกต์ทางวิศวกรรมส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนในท่อที่ไม่กลม โดยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลเป็นความยาวเฉพาะ (characteristic length) ซึ่งเรียกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค

เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค (Hydraulic diameter), D_h

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \tag{6.47}$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัด

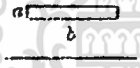
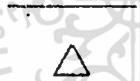
P คือ เส้นรอบรูปของการไหล

เส้นผ่านศูนย์กลางนี้จะใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น Re_D และ Nu_D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

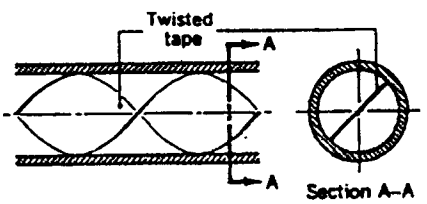
สำหรับการไหลแบบลามินาร์ ค่า Nu_D ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขปรับตัวเต็มที่แล้วหาได้จากตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่า Nu_D สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อพื้นที่หน้าตัดต่างๆ กัน

CROSS SECTION	$\frac{b}{a}$	$Nu_D \equiv \frac{hD_h}{k}$ (constant q_s'')	(constant T_s)
	—	4.36	3.66
	1.0	3.61	2.98
	1.43	3.73	3.08
	2.0	4.12	3.39
	3.0	4.79	3.96
	4.0	5.33	4.44
	8.0	6.49	5.60
	∞	8.23	7.54
	—	3.00	2.35

6.7 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Enhancement)

การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการทำให้เกิดการหมุนวนด้วยการสอดใส่แผ่นเกลียวบิดตามรูปที่ 6.6 การสอดแทรกนี้ประกอบด้วยแผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 360° เป็นผลให้ความเร็วของการไหลเพิ่ม เนื่องจากความเร็วสัมผัสเพิ่มใกล้ผนังท่อ การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นผลให้เกิดความดันลด (pressure drop) มากขึ้น



รูปที่ 6.6 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการติดแผ่นเกลียวบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.8 ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

กำลังของพัดลมที่ใช้ในการจ่ายอากาศผ่านท่อที่มีผนังเรียบ (P_o) เท่ากับกำลังของพัดลมที่ใช้ในการจ่ายอากาศผ่านท่อที่มีครีบลักษณะต่างๆ (P_r)

$$P_o = P_r$$

$$(PQ)_o = (PQ)_r$$

$$\left[\left(\frac{f\rho L\bar{V}^2}{2D_h}\right)(\bar{V}A)\right]_o = \left[\left(\frac{f\rho L\bar{V}^2}{2D_h}\right)(\bar{V}A)\right]_r$$

$$\left(f\bar{V}^3\right)_o = \left(f\bar{V}^3\right)_r$$

$$\left(f\,\mathrm{Re}^3\right)_o = \left(f\,\mathrm{Re}^3\right)_r$$

$$\frac{f_o}{f_r} = \frac{\mathrm{Re}_r^3}{\mathrm{Re}_o^3}$$

$$\frac{\mathrm{Re}_r}{\mathrm{Re}_o} = \left(\frac{f_o}{f_r}\right)^{1/3}$$

$$\frac{\mathrm{Re}_r}{\mathrm{Re}_o} = \frac{1}{(f_r/f_o)^{1/3}}$$

$$\mathrm{Re}_r = \frac{\mathrm{Re}_o}{(f_r/f_o)^{1/3}} \tag{6.48}$$

ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนพิจารณาที่กำลังของพัดลมที่ใช้ในการจ่ายอากาศผ่านท่อที่มีผนังเรียบและท่อที่มีครีบลักษณะต่างๆ เท่ากัน

$$Nu = f(\mathrm{Re})$$

$$\eta = \left.\frac{Nu}{Nu_o}\right|_{pumping\ power}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = \frac{Nu/Nu_o}{(f/f_o)^{1/3}} \tag{6.49}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การออกแบบและการคำนวณ

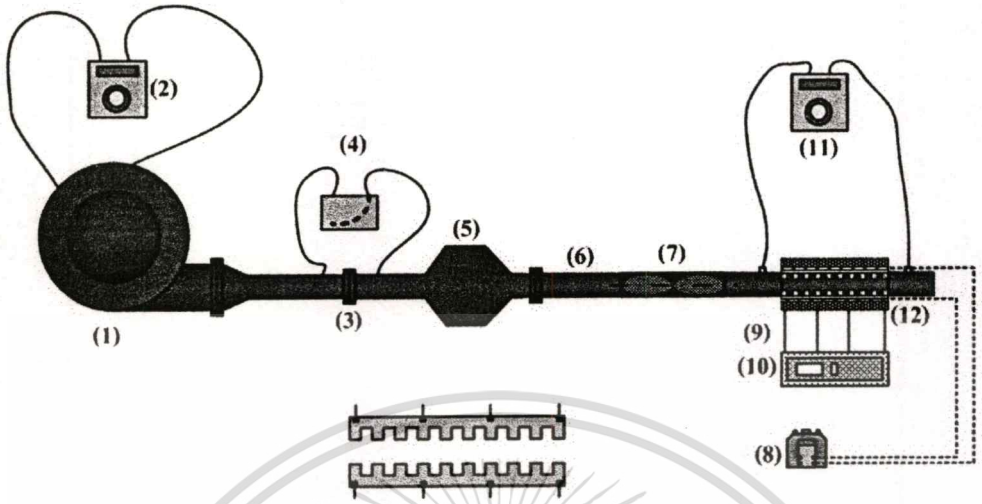
7.1 การออกแบบอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เทคนิคอากาศไหลแบบหมุนวนช่วยในการถ่ายเทความร้อน การไหลแบบหมุนวนได้ถูกนำมาใช้ในงานทางด้านอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก การหมุนวนได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มการสัมผัสกันของอากาศที่ถูกจ่ายเข้าภายในชุดทดลองกับอากาศที่ผิวครีบ การติดครีบและการใส่แผ่นบิดได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างอากาศที่ถูกจ่ายเข้าภายในชุดทดลองกับอากาศที่ผิวครีบ และช่วยเพิ่มระยะเวลาในการรับความร้อนที่ผิวครีบ ซึ่งการติดครีบที่ผิวภายในท่อเป็นผลให้อากาศเกิดความปั่นป่วนขึ้น สามารถนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ลดพื้นที่ผิวสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อน และเป็นผลให้อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดเล็กลง การใส่แผ่นบิดช่วยให้เกิดการไหลวนไปมาในบริเวณภายในชุดทดลองเป็นผลให้เกิดความปั่นป่วนมากขึ้นเป็นผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างของความปั่นป่วนในการไหลแบบหมุนวนนี้โดยทั่วไปมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ

ชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้าง 30 เซนติเมตร มีความยาว 44 เซนติเมตร และมีระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองเท่ากับ 3.2 เซนติเมตร ซึ่งผนังของชุดทดลองจะประกอบไปด้วยฉนวน 3 ชั้น ฉนวนชั้นแรกเป็นฉนวนใยแก้ว ฉนวนชั้นที่สองเป็นแผ่นกระเบื้อง ฉนวนชั้นที่สามเป็นฉนวนใยแก้ว และมีแผ่นปิดทั้งด้านบนและด้านล่างของชุดทดลอง ผิวภายนอกชุดทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวน ครีบทุกแบบทำจากอลูมิเนียมมีความกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างแต่ละครีบ 2 เซนติเมตร และมีระยะพิตช์ 4 เซนติเมตร ครีบต่างๆ เป็นส่วนหนึ่งของผนังที่ยื่นออกมาคือครีบและผนังเป็นเนื้อเดียวกันจะไม่มีความต้านทานของหน้าสัมผัสที่ฐานครีบ แผ่นครีบถูกติดกับผิวท่อแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แผ่นครีบแต่ละแผ่นจะมีครีบจำนวน 10 ครีบ แผ่นบางที่ถูกบิดตามเข็มนาฬิกา เป็นคาบของมุม 360° ถูกสอดใส่ในท่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.1 เซนติเมตร มีความยาว 20 เซนติเมตร และมีจำนวน 11 ท่อ โดยวางในแนวทิศทางของความเร็วลมตลอดหน้าตัดท่อทางเข้าชุดทดลอง เพื่อให้ลมเกิดการหมุนวน โดยหลักการทำงานของอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะใช้ Blower เป็นแหล่งจ่ายอากาศ ทำให้เกิดการไหลของอากาศผ่านถังพักลม ท่อทางเข้าชุดทดลอง และชุดทดลอง ในการทดลองกำหนดให้มีอัตราการไหลของอากาศในช่วงเรย์โนลด์นัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบอร์ Re = 3000 – 20000 ซึ่งอัตราการไหลของอากาศจะถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ และวัดค่าอัตราการไหลออกมาโดยชุดออริฟิสมิเตอร์



รูปที่ 7.1 ชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและตัวสร้างกระแสวน ประกอบด้วย (1) พัดลม, (2) อินเวอร์เตอร์, (3) ออริฟิสมิเตอร์, (4) มานอมิเตอร์, (5) ถังพักลม, (6) ท่อทางเข้าชุดทดลอง, (7) แผ่นบิด, (8) ชุดควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์, (9) เทอร์โมคัพเปิล, (10) ชุดวัดอุณหภูมิ, (11) ชุดวัดความดันตกคร่อม และ (12) ชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

7.2 การคำนวณ

7.2.1 พัดลม

การหาขนาดพัดลม โดยพิจารณาที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ Re = 20000 ซึ่งพัดลมรับภาระสูงสุด จากสมการเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค (Hydraulic diameter)

$$D_h = \frac{4A_c}{P}$$

$$= \frac{4\left(3.2\times30\times10^{-4}\right)}{\left(2\times3.2\times10^{-2}\right)+\left(2\times30\times10^{-2}\right)}$$

$$= 0.0578313m$$

จากตารางคุณสมบัติอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 318 K จะได้ $\rho = 1.099712\,kg/m^3$ และ $\mu = 191.3992795\times10^{-7}\ N\cdot s/m^2$

จากสมการเรย์โนลด์นัมเบอร์

$$\mathrm{Re}_D = \frac{\rho \bar{V} D_h}{\mu}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาความเร็วเฉลี่ย $\bar{V} = \frac{\mathrm{Re}_D \mu}{\rho D_h}$

$$= \frac{20000 \times 191.3992795 \times 10^{-7}}{1.099712 \times 0.0578313}$$

$$= 6.019\, m/s$$

จากสมการ $Q = \bar{V} A_c$

$$= 6.019 \times 3.2 \times 30 \times 10^{-4}$$

$$= 0.0577824\, m^3/s$$

$$= 3.467\, m^3/\mathrm{min}$$

ดังนั้นในการทดลองใช้พัดลมมีอัตราการไหลมากกว่า 3.467 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

7.2.2 ท่อทางเข้าชุดทดลอง

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ ($\mathrm{Re}_D \le 2300$) ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัว หาได้จากสมการ

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

เรย์โนลด์นัมเบอร์วิกฤติ สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากลามินาร์เป็นเทอร์บูเลนท์ เริ่มต้นจาก $\mathrm{Re}_{D,c} \approx 2300$ และการไหลเป็นแบบเทอร์บูเลนท์เต็มที่ ที่ $\mathrm{Re}_D \ge 4000$

ส่วนในการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ($\mathrm{Re}_D \ge 4000$) ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ และมีค่าประมาณดังนี้

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

สำหรับค่าที่ใช้ในที่นี้ เราจะสมมุติว่า $x_{fd} = 20 D_h$ สำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed flow)

จากสมการ $x_{fd} = 20 D_h$

$$= 20x0.0578313$$

$$= 1.157m$$

ดังนั้นในการทดลองใช้ท่อทางเข้าชุดทดลองมีความยาว 1.2 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

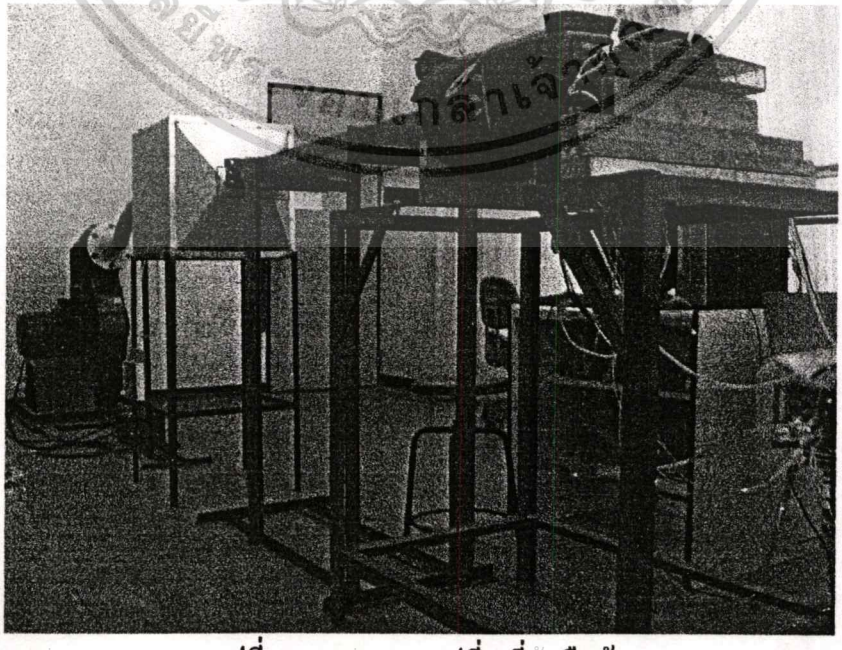
ในการทดลองชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและตัวสร้างกระแสวน สามารถแบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่หนึ่งเป็นการเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง ขั้นตอนที่สองเป็นการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง และขั้นตอนที่สามเป็นขั้นตอนการทดลองและเก็บผลการทดลอง

8.1 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

ในการศึกษาถึงผลของลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวนภายในท่อ และผลของรูปร่างครีบและตำแหน่งครีบ ซึ่งเป็นงานวิจัยเชิงการทดลอง การจัดเตรียมและสร้างอุปกรณ์ในการทดลองจึงมีการกล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

8.1.1 ชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลของลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวนภายในท่อ โดยทำการเปรียบเทียบผลของท่อที่มีผนังเรียบโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก และท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วโดยติดครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวนดังแสดงในรูปที่ 8.1



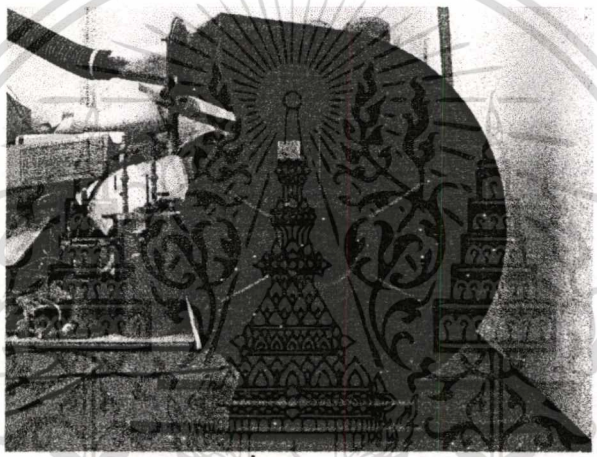
รูปที่ 8.1 ชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดลองมีความกว้าง 30 เซนติเมตร มีความยาว 44 เซนติเมตร และมีระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองเท่ากับ 3.2 เซนติเมตร ซึ่งผนังของชุดทดลองจะประกอบไปด้วยฉนวน 3 ชั้น ฉนวนชั้นแรกเป็นฉนวนใยแก้ว ฉนวนชั้นที่สองเป็นแผ่นกระเบื้อง ฉนวนชั้นที่สามเป็นฉนวนใยแก้ว และมีแผ่นปิดทั้งด้านบนและด้านล่างของชุดทดลอง ผิวภายนอกชุดทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวน

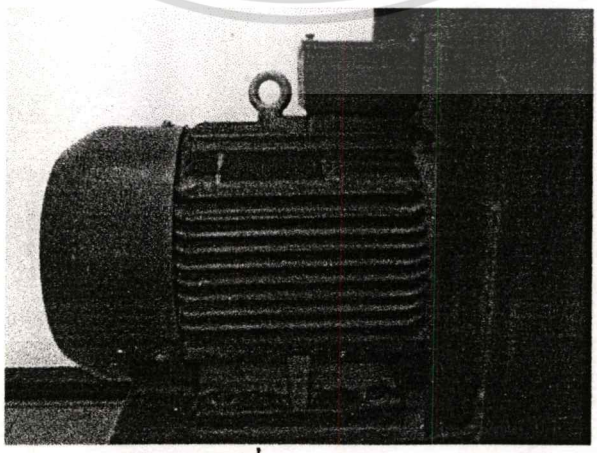
8.1.2 Supply Air

Blower MODEL TB-150 เป็นแหล่งจ่ายอากาศ ซึ่งเป็น Blower แบบ 12 ใบพัด ขนาด 7.5 กิโลวัตต์ หรือ 10 HP ใช้กระแสไฟฟ้า 380 V PRESSURE 700 mm.Aq ดังแสดงในรูปที่ 8.2



รูปที่ 8.2 Blower

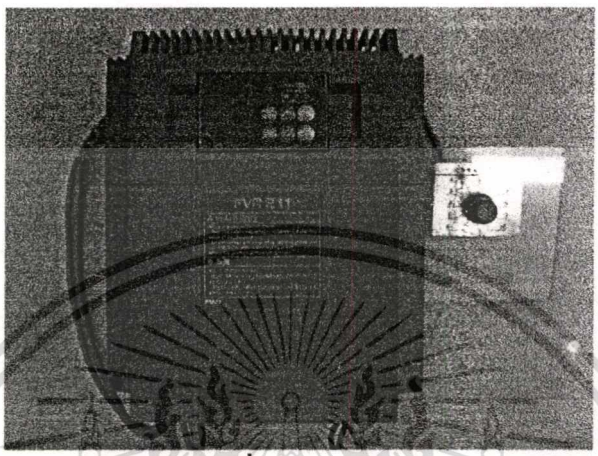
Motor เป็นต้นกำลังในการขับ Blower ขนาด 7.5 กิโลวัตต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 380 V 50 Hz 2900 rpm 14.8 A ดังแสดงในรูปที่ 8.3



รูปที่ 8.3 Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

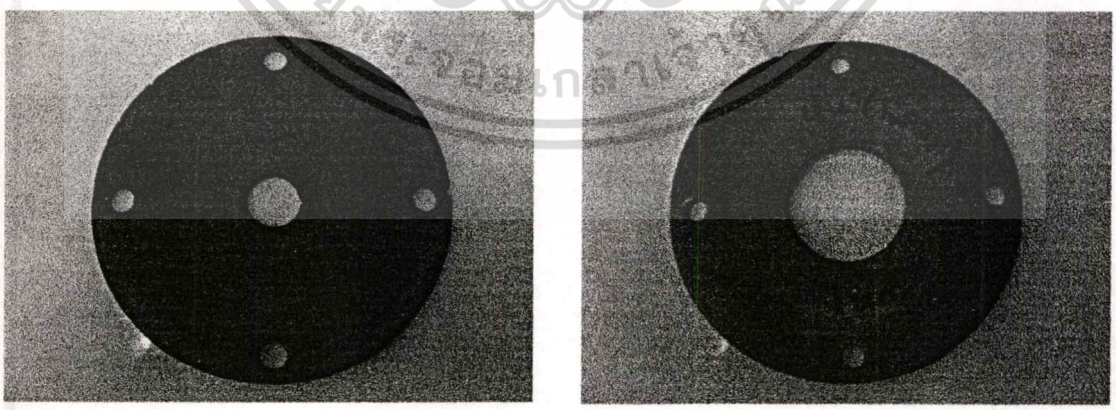
Inverter TYPE FVR7.5E11S-4JE ถูกนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับ Blower ในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตามที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 8.4 โดย Inverter สามารถปรับความเร็วรอบได้สูงสุดเท่ากับ 2400 rpm และมีค่าความละเอียดในการปรับความเร็วรอบในหลักหน่วย ใช้กระแสไฟฟ้า 380 V 3 PHASES



รูปที่ 8.4 Inverter

8.1.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

Orifice meter เป็นอุปกรณ์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศ โดย Orifice meter เป็นชุดวัดอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 8.5 ในการสร้างอุปกรณ์ Orifice meter ได้สร้างตามมาตรฐานของ JIS (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD) Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes JIS Z 8762

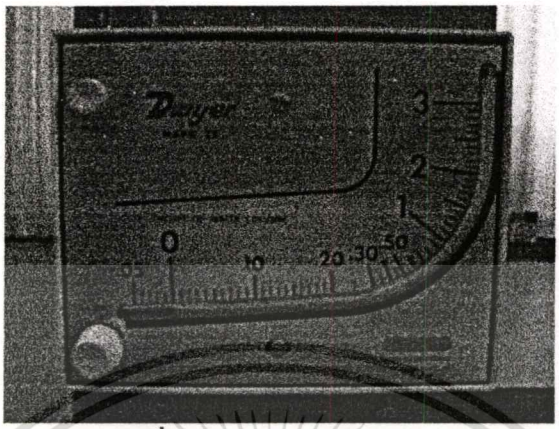


รูปที่ 8.5 Orifice meter

Manometer ใช้วัดความแตกต่างของความดัน เพื่อใช้หาอัตราการไหลของอากาศ ความแตกต่างของความดัน ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากความแตกต่างของระดับน้ำ Inclined manometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mark II Model No.25 ใช้วัดความแตกต่างของความดันที่มีค่าน้อย ซึ่งจะทำให้สามารถอ่านค่าของระดับ red gage oil (specific gravity 0.826) ได้มีความถูกต้องมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8.6



รูปที่ 8.6 Inclined manometer

8.1.4 ถังพักลม

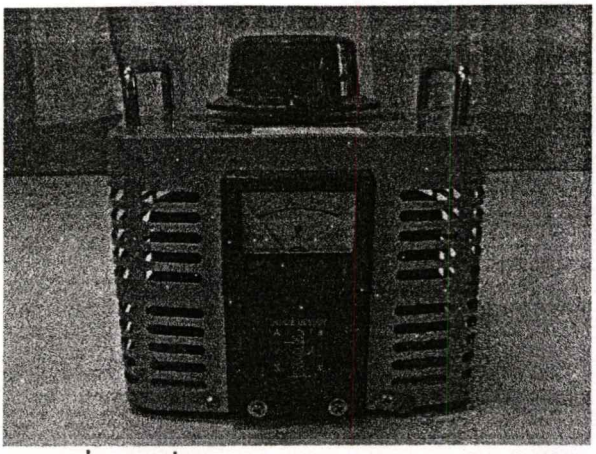
ถังพักลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับความเร็วลมให้คงที่ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม มีความกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร และความสูง 50 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 8.7

รูปที่ 8.7 ถังพักลม

8.1.5 อุปกรณ์ควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์

เครื่องควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์ แบบสไลด์โวลท์เทจ TDGC 2-3 kVA CAPACITY : 3000 VA MAX. 12 Amp เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมโวลท์เทจที่ให้กับแผ่นฮีตเตอร์ ในการควบคุมฟลักซ์ความร้อนของแผ่นฮีตเตอร์ให้ได้ตามที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 8.8 โดยเครื่องควบคุมความร้อนสามารถปรับโวลท์เทจได้สูงสุดเท่ากับ 250 V

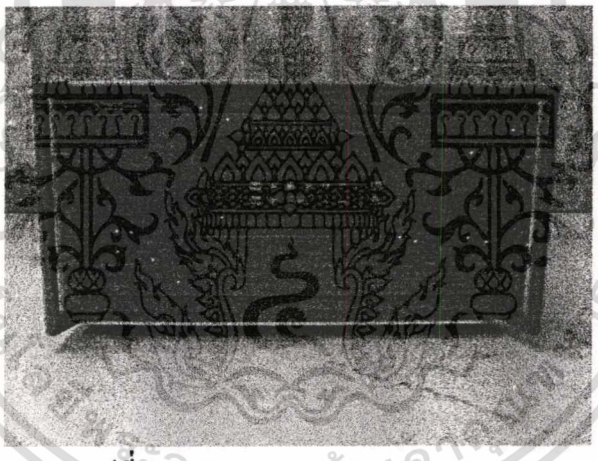
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



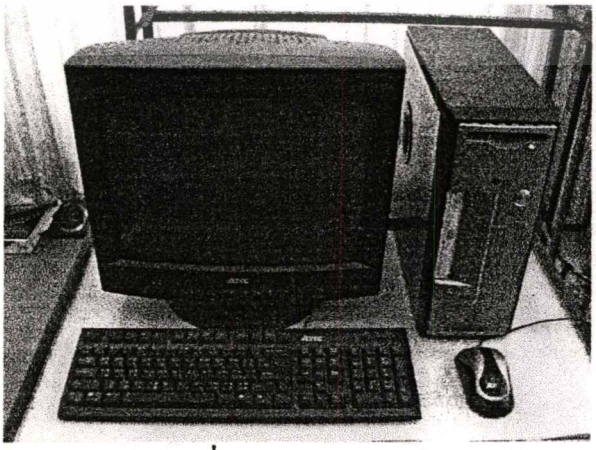
รูปที่ 8.8 เครื่องควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์

8.1.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

Data Logger FLUKE 2680A เป็นอุปกรณ์แสดงอุณหภูมิผิวครีบที่ตำแหน่งต่างๆ อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบ และอุณหภูมิที่ทางออกครีบดังแสดงในรูปที่ 8.9 สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ทั้งหมด 120 ตำแหน่ง



รูปที่ 8.9 Data Logger FLUKE 2680A

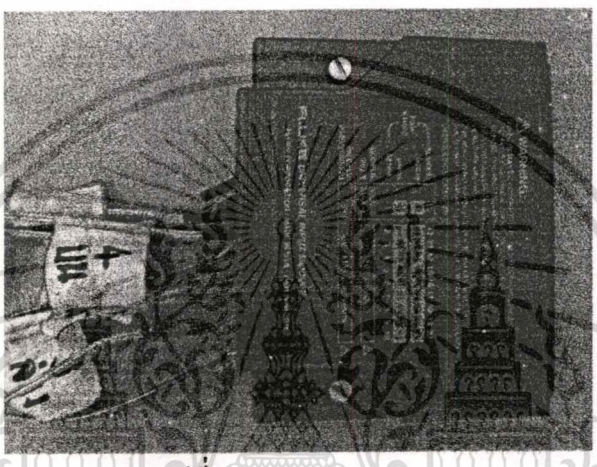


รูปที่ 8.10 คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวครีบแผ่นละ 4 ตำแหน่ง อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบ อุณหภูมิที่ทางออกครีบ และใช้เก็บข้อมูลความดันตกคร่อมระหว่างข้างหน้าครีบและข้างหลังครีบดังแสดงในรูปที่ 8.10 คอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่อง โดยต่อเข้ากับ Data Logger และเครื่องวัดความดันตกคร่อม

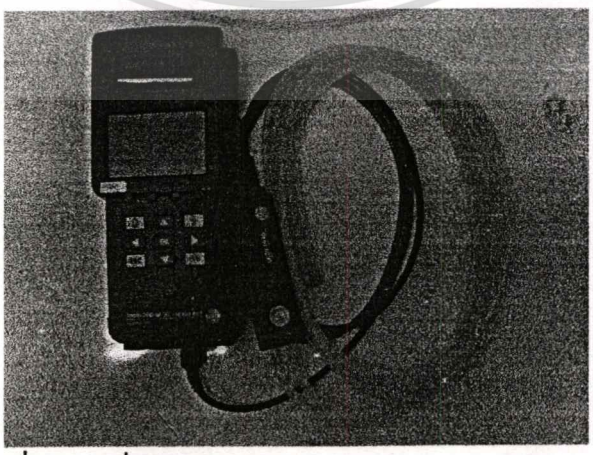
Thermocouple เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิผิวครีบ อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบ และอุณหภูมิที่ทางออกครีบดังแสดงในรูปที่ 8.11 ซึ่งเป็น Thermocouple type K และใช้ Thermocouple ในการทดลองทั้งหมด 10 ตัว



รูปที่ 8.11 Thermocouple

8.1.7 อุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม

เครื่องวัดความดันตกคร่อม TESTO 350-M/XL เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันตกคร่อมระหว่างตำแหน่งทางเข้า 3.5 เซนติเมตร ข้างหน้าครีบและตำแหน่งทางออก 3.5 เซนติเมตร ข้างหลังครีบในขณะที่ทำการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8.12

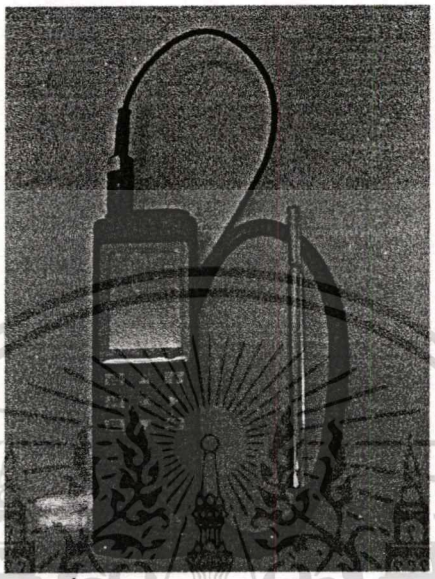


รูปที่ 8.12 เครื่องวัดความดันตกคร่อม TESTO 350-M/XL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.1.8 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ

เครื่องวัดความเร็วของอากาศ TESTO 445 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วลมที่ตำแหน่งทางออกชุดทดลอง ในขณะที่ทำการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8.13

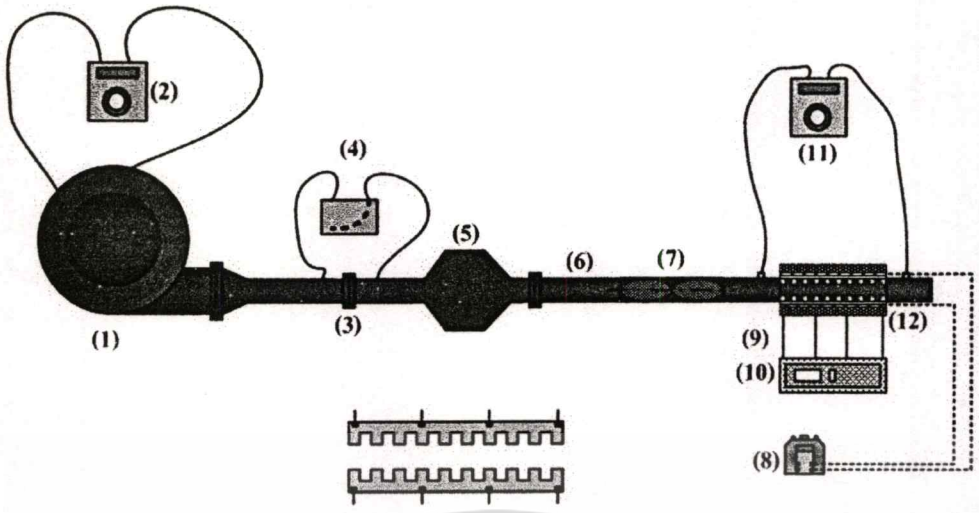


รูปที่ 8.13 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ TESTO 445

8.2 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและตัวสร้างกระแสวน และอุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 8.14 ซึ่งประกอบด้วยชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองเท่ากับ 3.2 เซนติเมตร ท่อทางเข้าชุดทดลองทำจากอะคริลิกใสขนาดหน้าตัดกว้าง 30 เซนติเมตร สูง 3.2 เซนติเมตร และมีความยาว 120 เซนติเมตร สอดใส่แผ่นบางที่ถูกบิดตามเข็มนาฬิกา เป็นคาบของมุม 360° ในท่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.1 เซนติเมตร มีความยาว 20 เซนติเมตร และมีจำนวน 11 ท่อ โดยวางในแนวทิศทางของความเร็วลมตลอดหน้าตัดท่อทางเข้าชุดทดลอง ครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความหนา 6 มิลลิเมตร, ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสลม และด้านมุมฉากสัมผัสลม, ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 และ 4 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับตลอดความกว้างครีบ และ 4 และ 6 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับตลอดความกว้างครีบ ครีบทุกแบบทำจากอลูมิเนียมมีความกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างแต่ละครีบ 2 เซนติเมตร และมีระยะพิตช์ 4 เซนติเมตร ครีบต่างๆ เป็นส่วนหนึ่งของผนังที่ยื่นออกมาคือครีบและผนังเป็นเนื้อเดียวกันจะไม่มีความต้านทานของหน้าสัมผัสที่ฐานครีบ แผ่นครีบถูกติดกับผิวท่อแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แผ่นครีบแต่ละแผ่นจะมีครีบจำนวน 10 ครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.14 ชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและตัวสร้างกระแสวน ประกอบด้วย (1) พัดลม, (2) อินเวอร์เตอร์, (3) ออริฟิสมิเตอร์, (4) มานอมิเตอร์, (5) ถังพักลม, (6) ท่อทางเข้าชุดทดลอง, (7) แผ่นบิด, (8) ชุดควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์, (9) เทอร์โมคัพเปิล, (10) ชุดวัดอุณหภูมิ, (11) ชุดวัดความดันตกคร่อม และ (12) ชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

พัดลมขนาด 7.5 กิโลวัตต์ มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบขับลมผ่านท่อ โดยที่ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าจะถูกวัดด้วย Orifice meter อากาศในชุดทดลองถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยแผ่นฮีตเตอร์ขนาด 500 วัตต์ จำนวน 2 แผ่น โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ซึ่งมีพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร และยาว 38 เซนติเมตร ที่ผิวครีบทั้งสอง ผิวภายนอกชุดทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวนในช่วงระยะการทำความร้อนโดยแผ่นฮีตเตอร์ การวัดอุณหภูมิผิวครีบแต่ละแผ่นถูกวัดด้วยเทอร์โมคัพเปิลชนิด K จำนวน 4 ตัว โดยตำแหน่งที่ทำการวัดมีระยะห่างเท่ากับ 12 เซนติเมตร และอ่านค่าจาก Data Logger ความดันตกคร่อมระหว่างตำแหน่งทางเข้า 3.5 เซนติเมตร ข้างหน้าครีบ และตำแหน่งทางออก 3.5 เซนติเมตร ข้างหลังครีบ อ่านค่าจากเครื่องวัดความดันตกคร่อม

8.3 วิธีการทดลอง

พิจารณาผลของท่อที่มีครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก และท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วโดยติดแผ่นครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรง

1. ทำการติดแผ่นครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง และปรับความเร็วลมในชุดทดลองให้ได้เท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที

3. เปิดเครื่องให้ความร้อน โดยให้ผิวท่อได้รับความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่

4. สังเกตอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ คงที่

5. บันทึกผลของความดันตกคร่อม อุณหภูมิผิวครีบ อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบ และอุณหภูมิที่ทางออกครีบ

6. ปรับความเร็วลมลดลงเรื่อยๆ โดยให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์อยู่ระหว่าง Re = 3000 – 20000 แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 4 – 5

7. ทำการติดแผ่นครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเยื้อง แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 2 – 6 ใหม่ตามลำดับ

พิจารณาผลของท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

1. ทำการติดแผ่นครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกัน

2. สอดใส่แผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 360° ในท่อกลมจำนวน 11 ท่อ และใส่ลงในชุดทดลอง เพื่อให้ลมเกิดการหมุนวน

3. เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง และปรับความเร็วลมในชุดทดลองให้ได้เท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที

4. เปิดเครื่องให้ความร้อน โดยให้ผิวท่อได้รับความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่

5. สังเกตอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ คงที่

6. บันทึกผลของความดันตกคร่อม อุณหภูมิผิวครีบ อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบ และอุณหภูมิที่ทางออกครีบ

7. ปรับความเร็วลมลดลงเรื่อยๆ โดยให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์อยู่ระหว่าง Re = 3000 – 20000 แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 5 – 6

8. ทำการติดแผ่นครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเยื้อง แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 3 – 7 ใหม่ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9

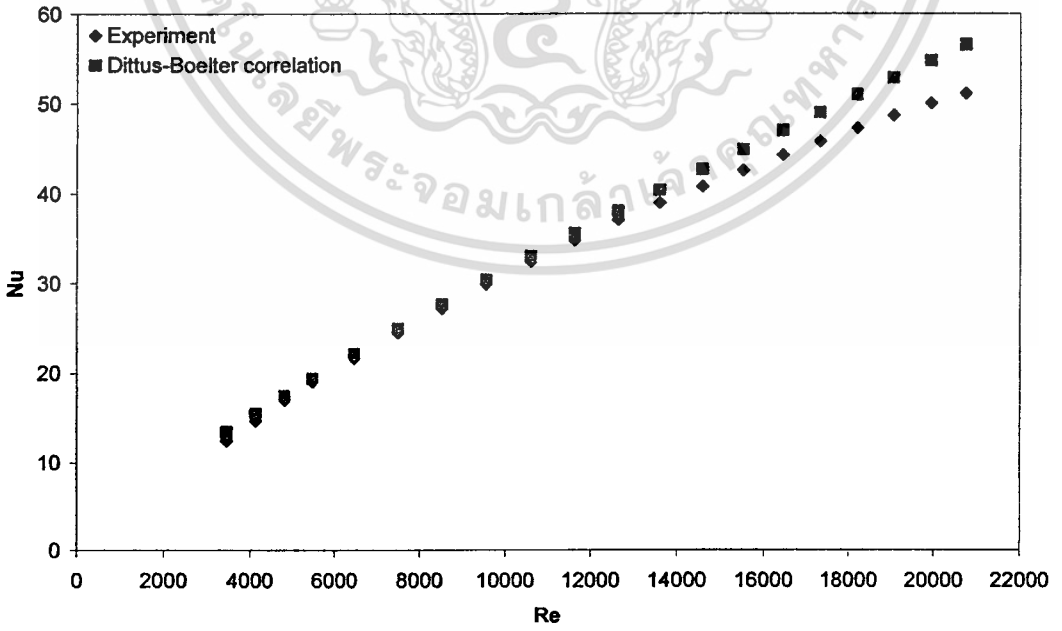
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สามารถแยกการวิเคราะห์ได้เป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ผลสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient) และการวิเคราะห์ผลตัวประกอบเสียดทาน (Friction Factor) ดังต่อไปนี้

9.1 ผลการทดลองท่อมีผนังเรียบ

9.1.1 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number)

ในรูปที่ 9.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีผนังเรียบ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ค่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากการทดลองและค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากทฤษฎี (Dittus-Boelter correlation) พบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากทฤษฎีมีค่ามากกว่าค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากการทดลอง โดยค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ -8.15 % เมื่อเทียบกับ Dittus-Boelter correlation โดยค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากทฤษฎี (Dittus-Boelter correlation) ใช้หา Nu สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลมผิวเรียบ ในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re_D \geq 10000$

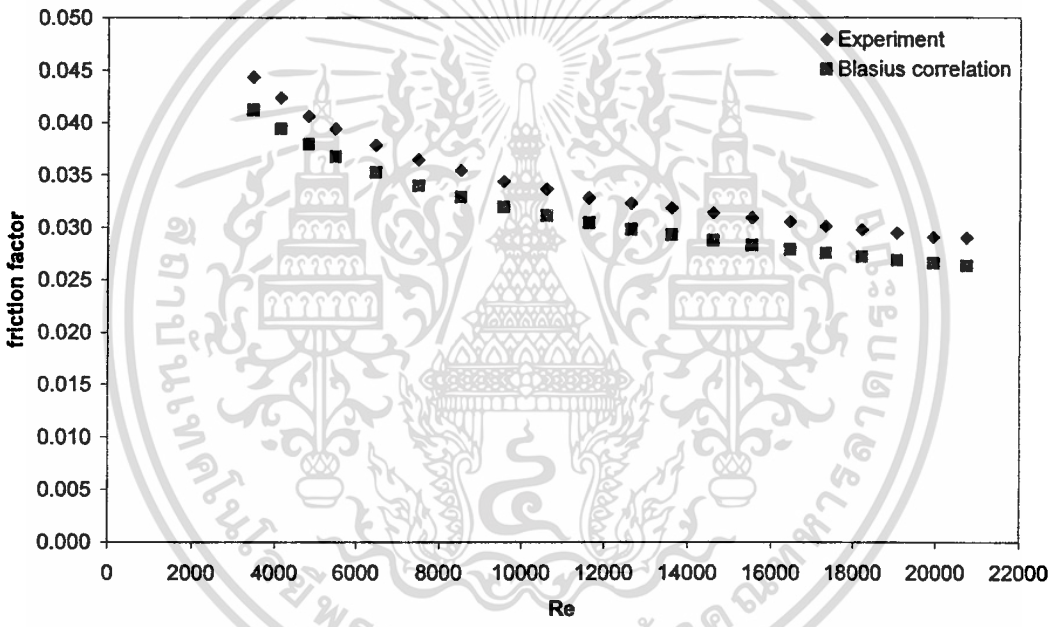


รูปที่ 9.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีผนังเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.1.2 ค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor)

ในรูปที่ 9.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีผนังเรียบ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองและค่าตัวประกอบเสียดทานจากทฤษฎี (Blasius correlation) พบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าตัวประกอบเสียดทานจากทฤษฎี โดยค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 5.38 % เมื่อเทียบกับ Blasius correlation โดยค่าตัวประกอบเสียดทานจากทฤษฎี (Blasius correlation) ใช้หา friction factor สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลมผิวเรียบ ในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ $\mathrm{Re}_D \leq 20000$



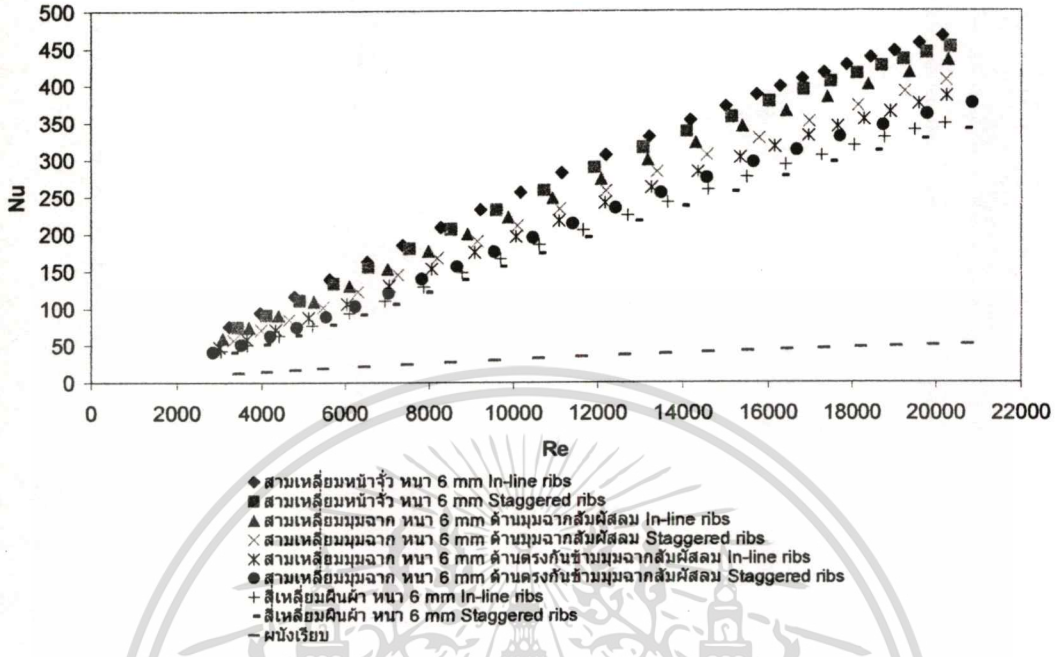
รูปที่ 9.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีผนังเรียบ

9.2 อิทธิพลรูปร่างครีบ

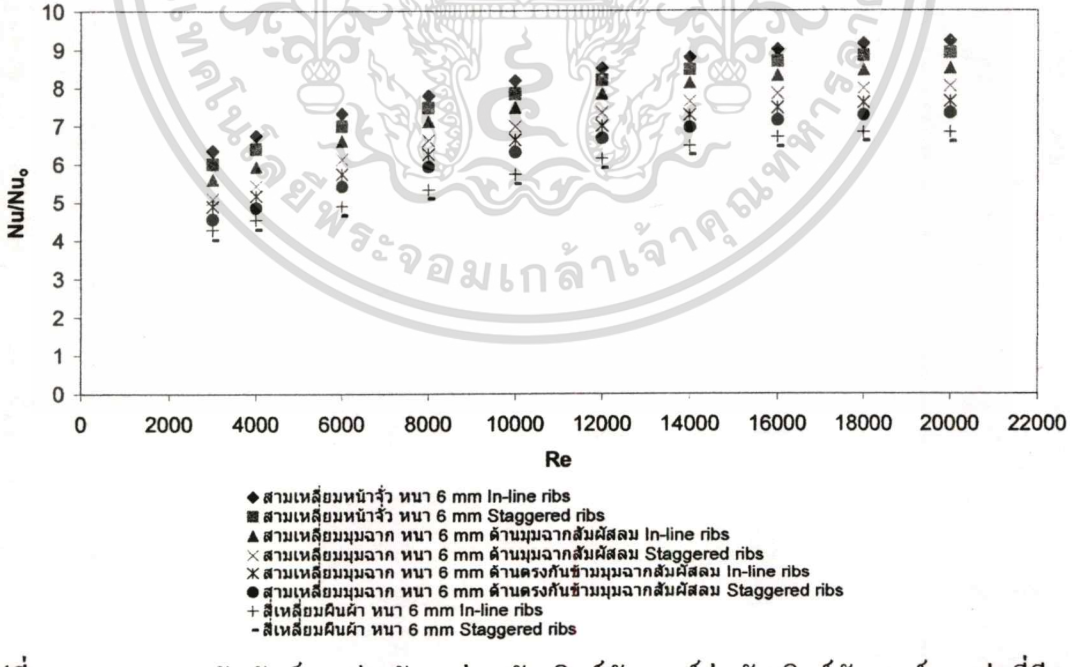
ในรูปที่ 9.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ เมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบทุกแบบเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์มากที่สุด ตามด้วยครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ด้านมุมฉากสัมผัสลม และด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสลม ครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความหนา 6 มิลลิเมตร และท่อที่มีผนังเรียบ ซึ่งมีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์ลดลงตามลำดับ การติดตั้งครีบลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆ แบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์มากกว่าการติดตั้งครีบแบบมีแนวเยื้องเมื่อเทียบกับครีบรูปร่างเดียวกัน



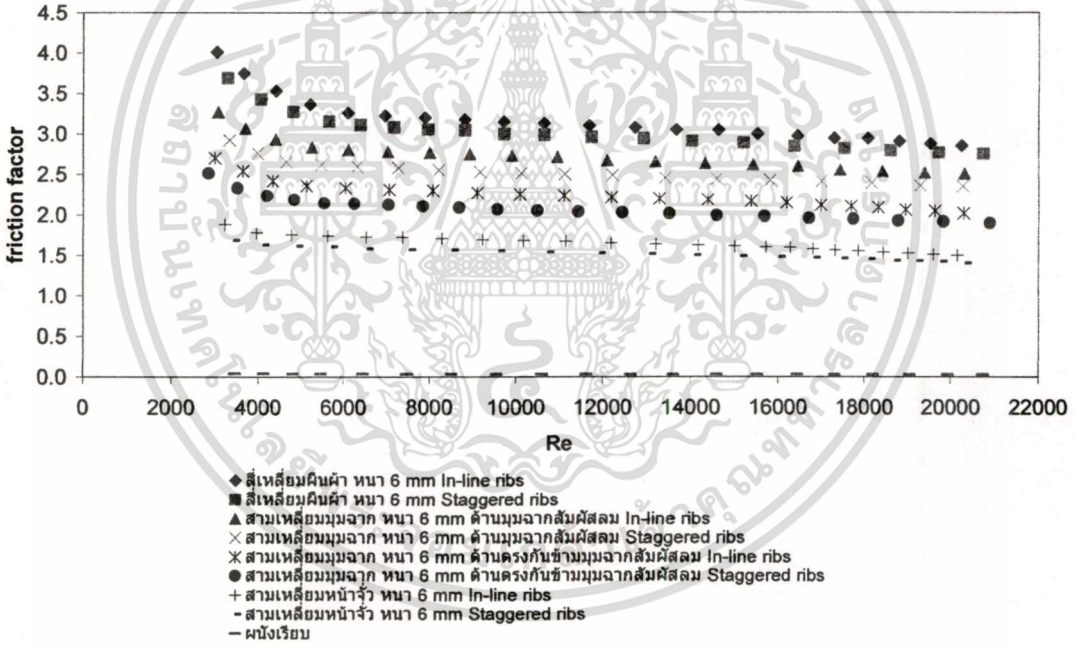
รูปที่ 9.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง



รูปที่ 9.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 9.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 8.11 และ 7.78 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ด้านมุมฉากสัมผัสลม มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 7.40 และ 6.91 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสลม มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 6.57 และ 6.25 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความหนา 6 มิลลิเมตร มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 5.77 และ 5.53 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ



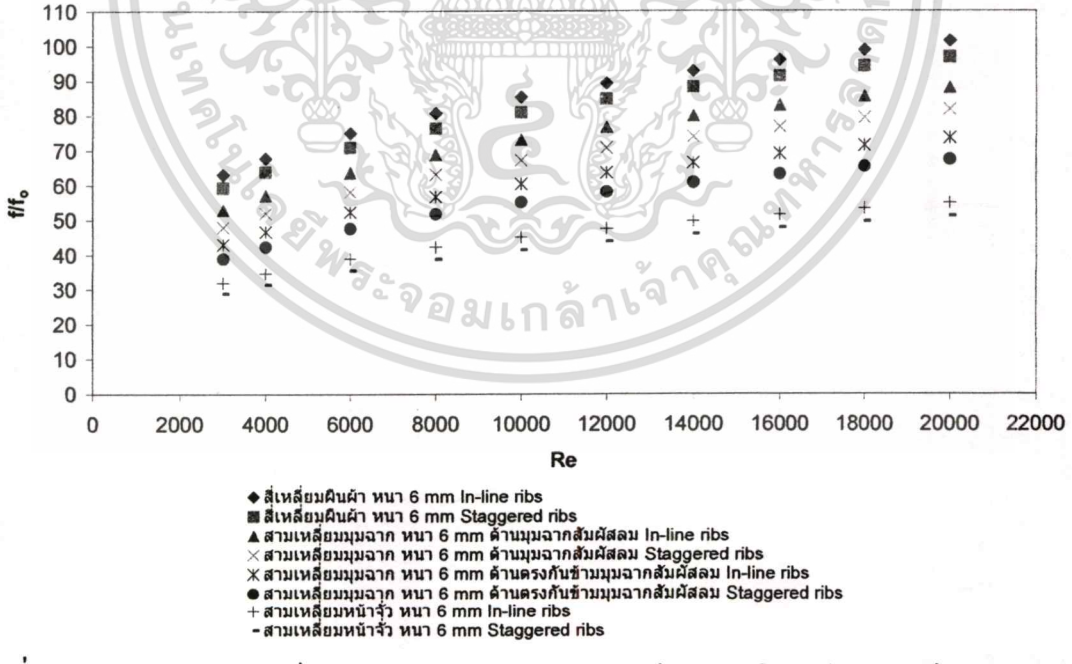
รูปที่ 9.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

ในรูปที่ 9.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบทุกแบบมีค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น ท่อที่มีผนังเรียบมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุด ตามด้วยครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิเมตร โดยให้ด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสลม และด้านมุมฉากสัมผัสลม และครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความหนา 6 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามลำดับ การติดตั้งครีบลักษณะต่างๆ แบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่าการติดตั้งครีบแบบมีแนวเยื้องเมื่อเทียบกับครีบรูปร่างเดียวกัน

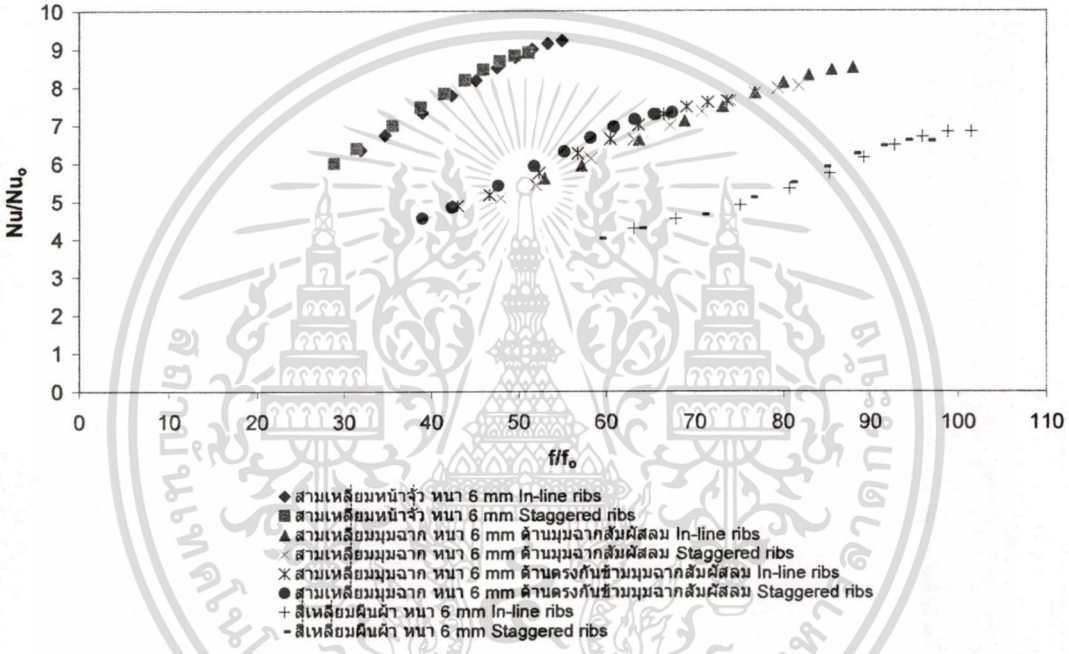
ในรูปที่ 9.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความหนา 6 มิลลิเมตร มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 85.04 และ 80.64 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ด้านมุมฉากสัมผัสลม มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 72.88 และ 67.09 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสลม มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 60.33 และ 55.08 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 44.97 และ 41.42 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ



รูปที่ 9.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 9.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ เมื่อค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบของครีบทุกแบบเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การทำให้พื้นที่ผิวภายในท่อขรุขระหรือติดครีบที่ผิวภายในท่อเพื่อให้อากาศเกิดความปั่นป่วนขึ้น เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

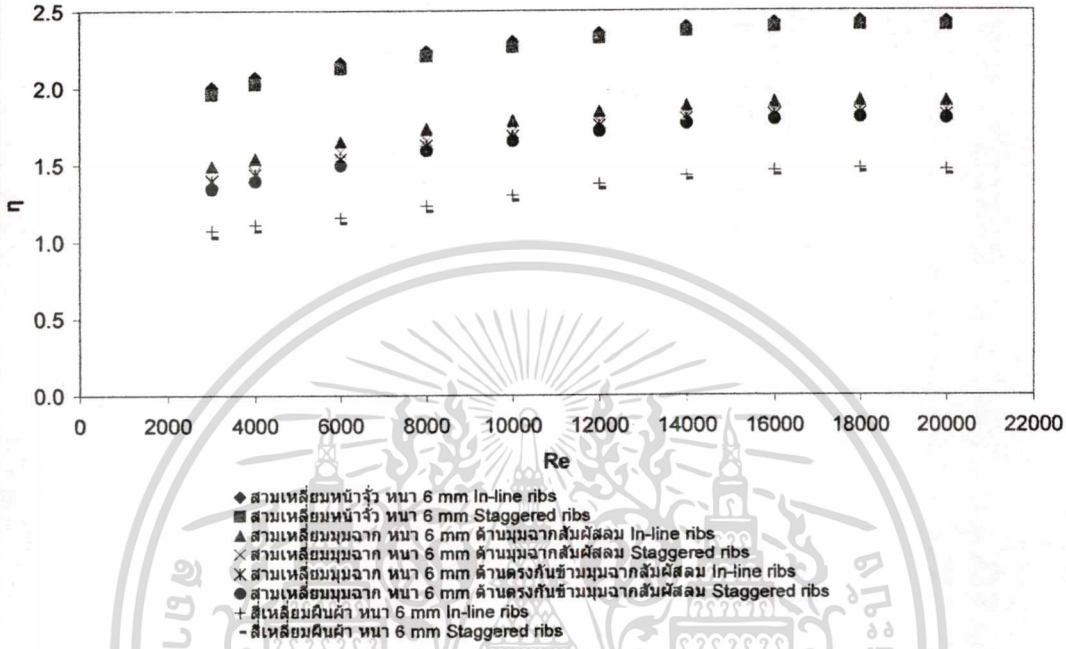


รูปที่ 9.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

ในรูปที่ 9.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 2.28 และ 2.25 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ด้านมุมฉากสัมผัสลม มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 1.77 และ 1.70 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสลม มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 1.67 และ 1.64 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความหนา 6 มิลลิเมตร มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 1.31 และ 1.28 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ



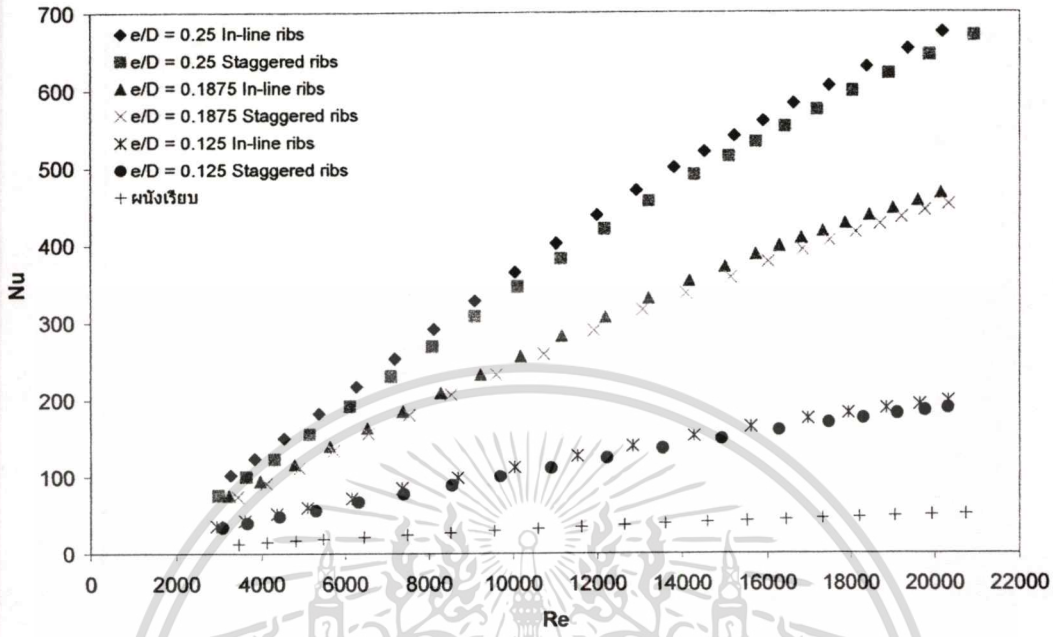
รูปที่ 9.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบลักษณะต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

9.3 อิทธิพลความสูงครีบต่อระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว

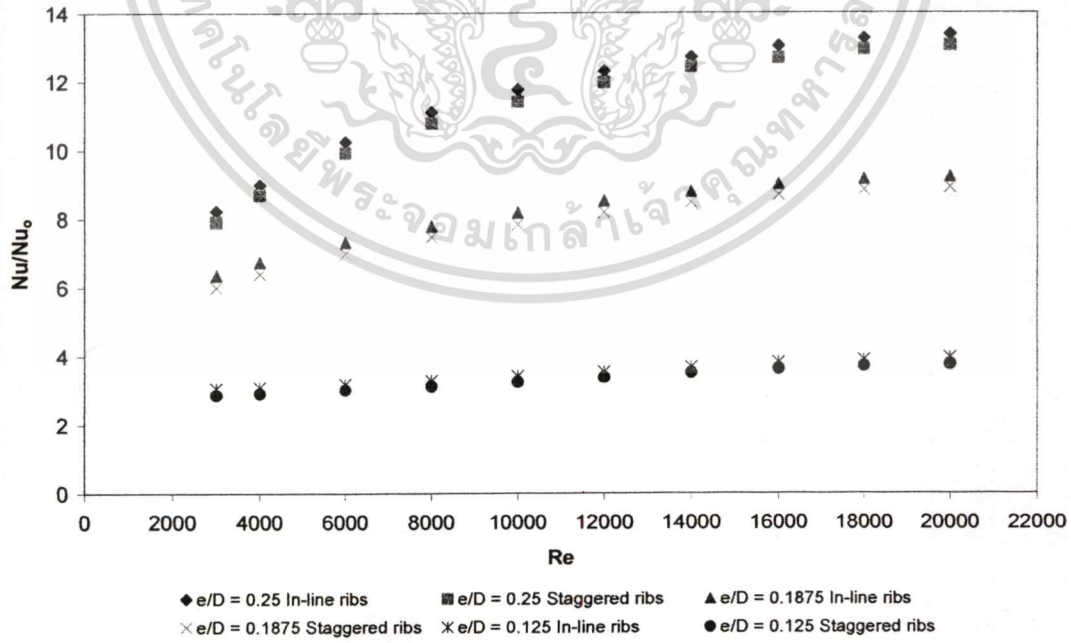
ในรูปที่ 9.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ เมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การติดตั้งครีบแบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์มากกว่าการติดตั้งครีบแบบมีแนวเยื้อง และจากการทดลองยังพบอีกว่าเมื่ออัตราส่วน e/D มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยมีขอบเขตการศึกษาอัตราส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองในช่วงอัตราส่วน $e/D < 0.5$ พบว่าที่อัตราส่วน $e/D = 0.5$ ความสูงครีบเท่ากับ 1.6 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองเท่ากับ 3.2 เซนติเมตร เมื่อติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกัน จะไม่ทำให้เกิดการไหลของอากาศผ่านชุดทดลอง



รูปที่ 9.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

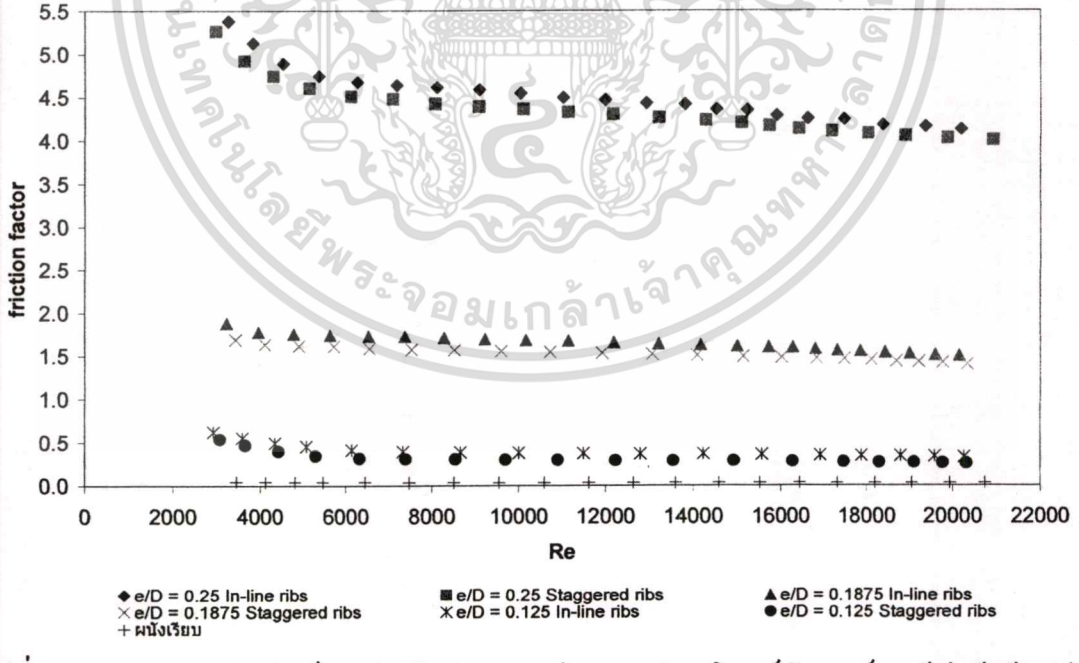


รูปที่ 9.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 9.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน e/D = 0.25 มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 11.50 และ 11.18 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน e/D = 0.1875 มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 8.11 และ 7.78 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน e/D = 0.125 มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 3.50 และ 3.32 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ

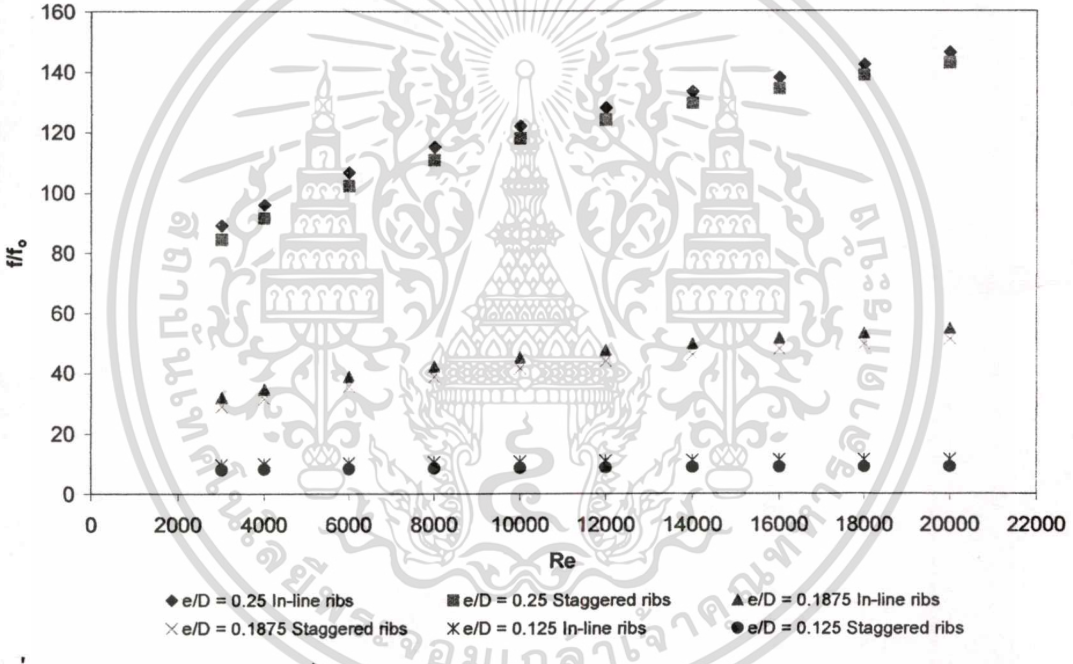
ในรูปที่ 9.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ มีค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น การติดตั้งครีบแบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่าการติดตั้งครีบแบบมีแนวเยื้อง และจากการทดลองยังพบอีกว่าเมื่ออัตราส่วน e/D มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 9.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 9.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน e/D = 0.25 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 121.68 และ 117.59 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน e/D = 0.1875 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 44.97 และ 41.42 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน e/D = 0.125 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 10.75 และ 8.57 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ

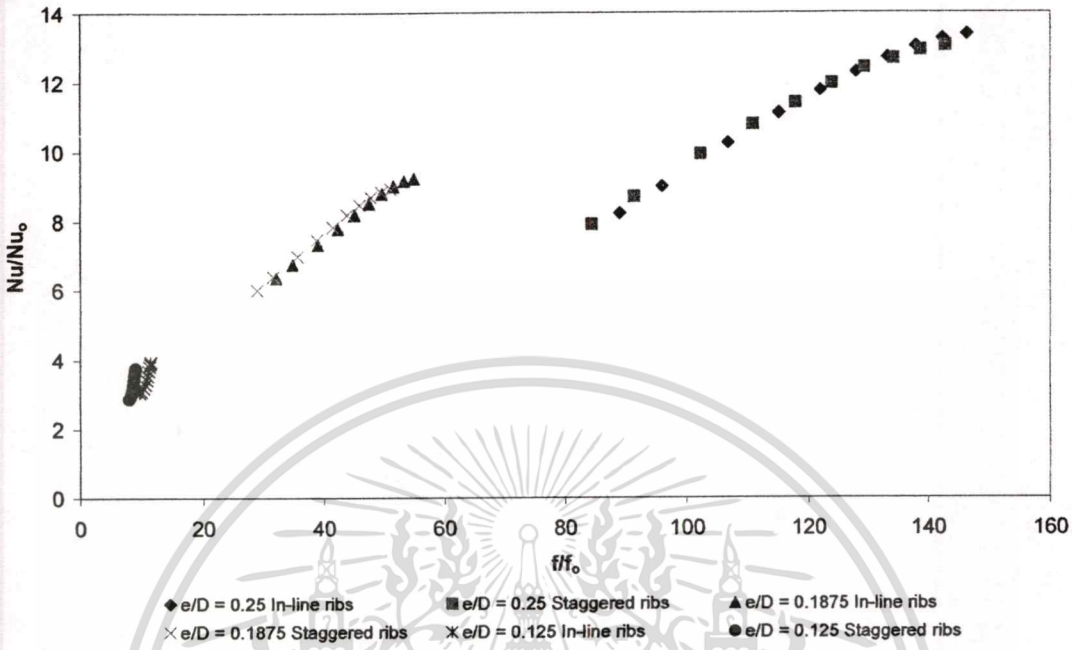


รูปที่ 9.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

ในรูปที่ 9.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ เมื่อค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบของครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

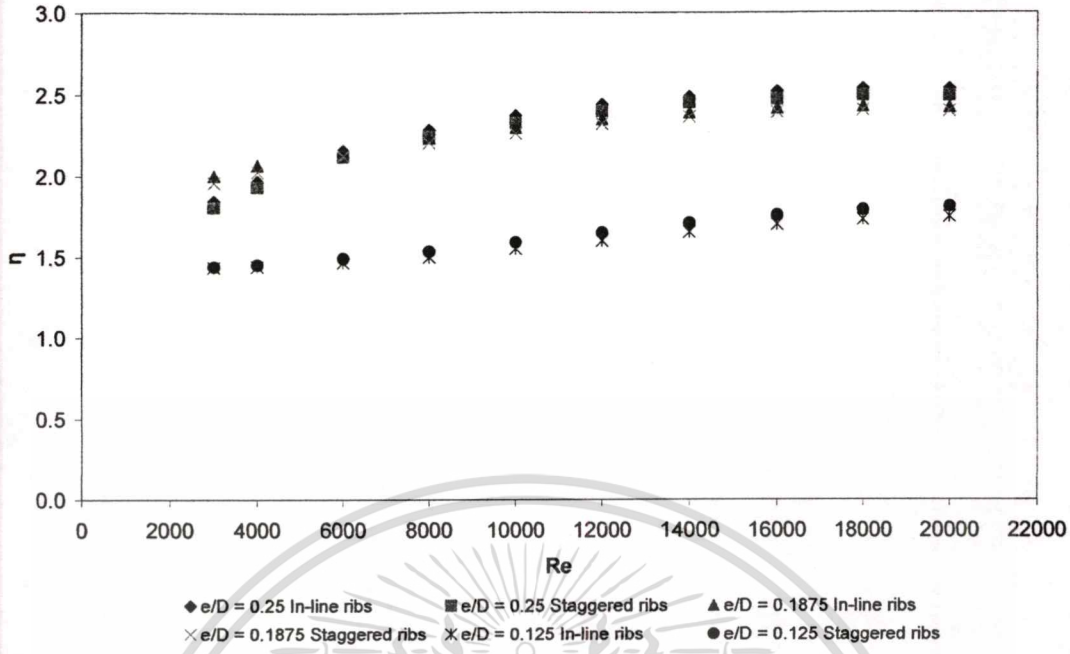
เรียบเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การทำให้พื้นที่ผิวภายในท่อขรุขระหรือติดครีบที่ผิวภายในท่อเพื่อให้อากาศเกิดความปั่นป่วนขึ้น เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

ในรูปที่ 9.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน e/D = 0.25 มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 2.32 และ 2.28 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน e/D = 0.1875 มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 2.28 และ 2.25 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน e/D = 0.125 มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 1.58 และ 1.62 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



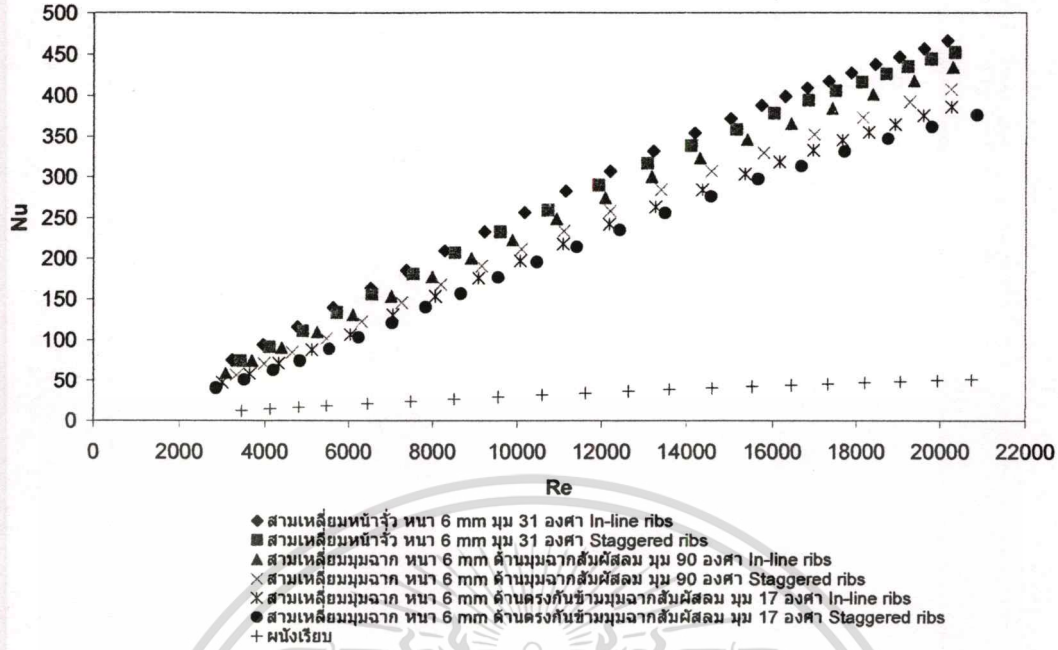
รูปที่ 9.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

9.4 อิทธิพลมุมปะทะ

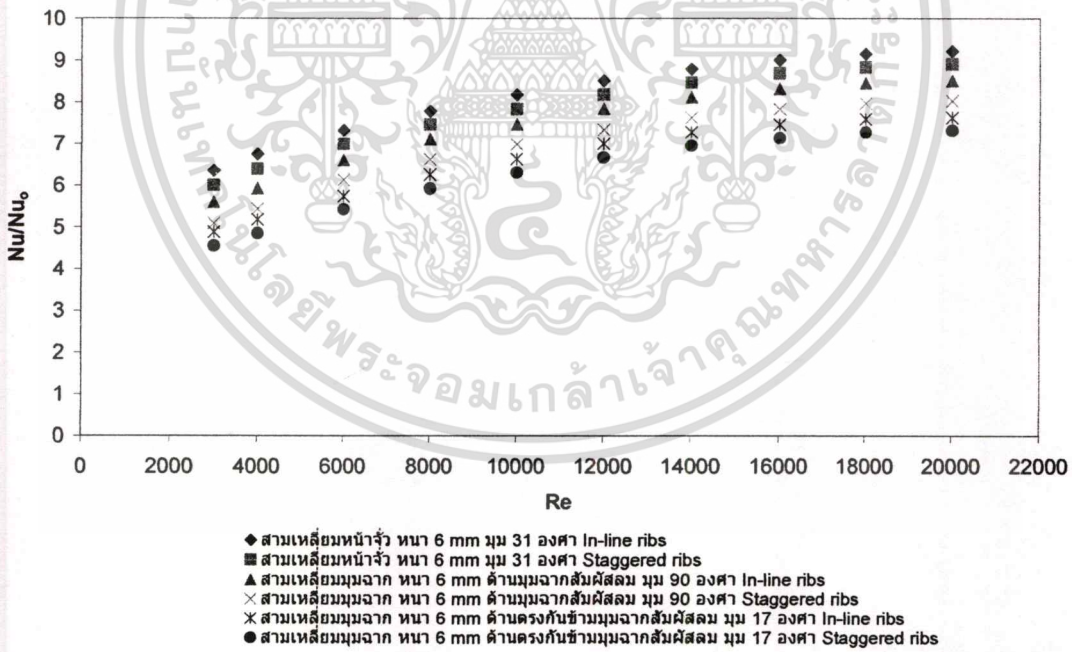
ในรูปที่ 9.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ เมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบมุมต่างๆ เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ครีบมุม 31 องศา มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์มากที่สุด ตามด้วยครีบมุม 90 องศา ครีบมุม 17 องศา และท่อที่มีผนังเรียบ ซึ่งมีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์ลดลงตามลำดับ การติดตั้งครีบแบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์มากกว่าการติดตั้งครีบแบบมีแนวเยื้อง

ในรูปที่ 9.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบมุม 31 องศา มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 8.11 และ 7.78 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบมุม 90 องศา มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 7.40 และ 6.91 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบมุม 17 องศา มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 6.57 และ 6.25 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



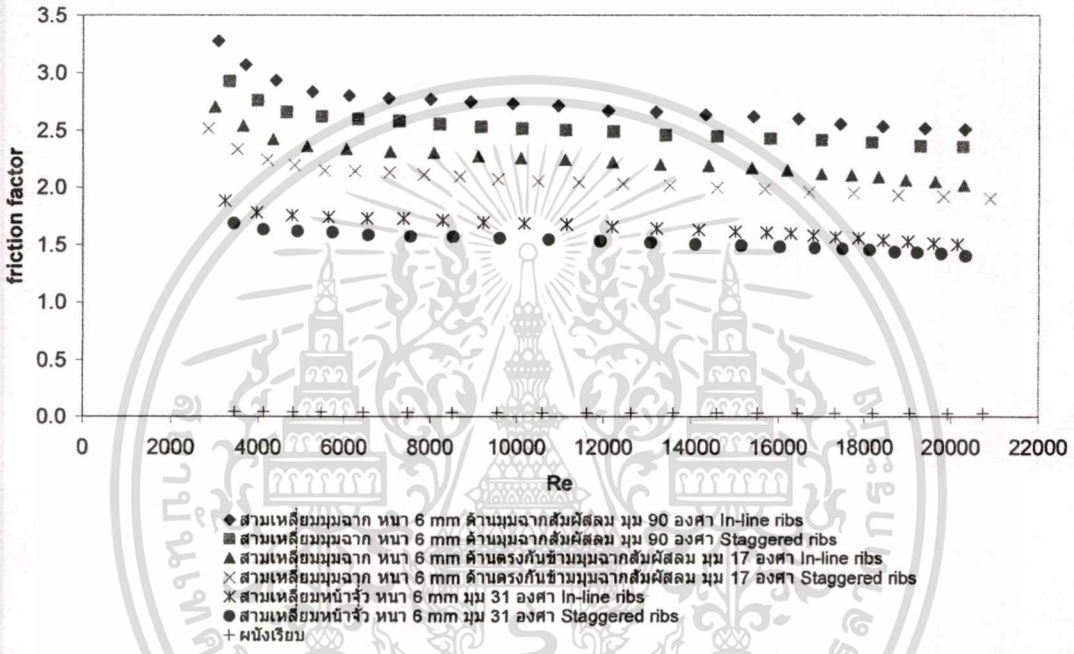
รูปที่ 9.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง



รูปที่ 9.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

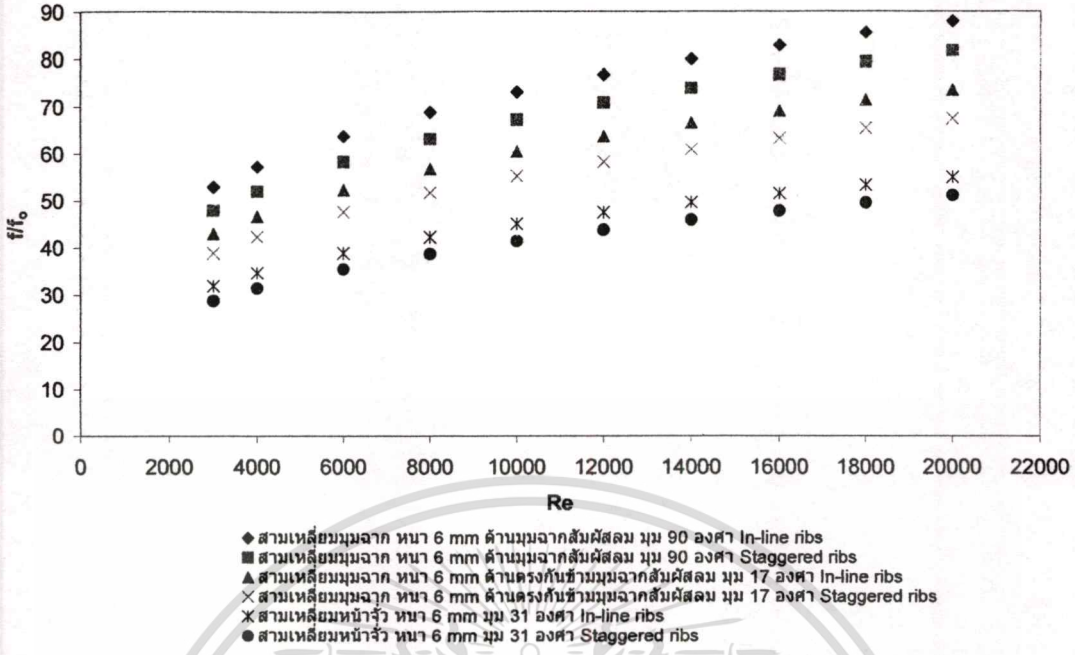
ในรูปที่ 9.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบมุมต่างๆ มีค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น ท่อที่มีผนังเรียบมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุด ตามด้วยครีบมุม 31 องศา ครีบมุม 17 องศา และครีบมุม 90 องศา ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามลำดับ การติดตั้งครีบแบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่าการติดตั้งครีบแบบมีแนวเยื้อง



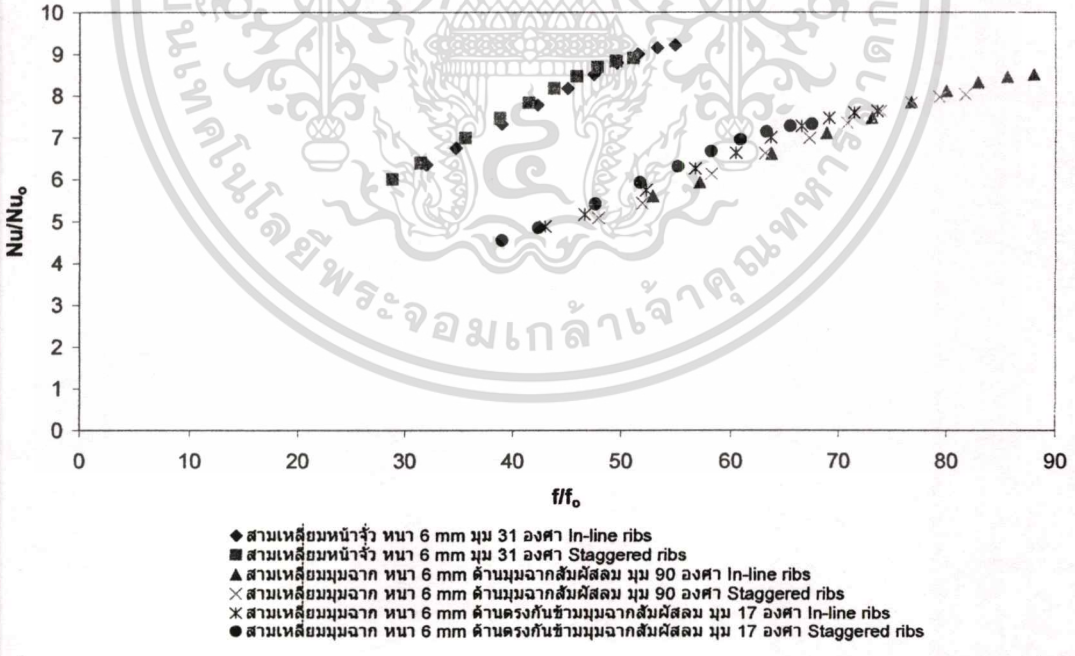
รูปที่ 9.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

ในรูปที่ 9.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบมุม 90 องศา มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 72.88 และ 67.09 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบมุม 17 องศา มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 60.33 และ 55.08 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบมุม 31 องศา มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 44.97 และ 41.42 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

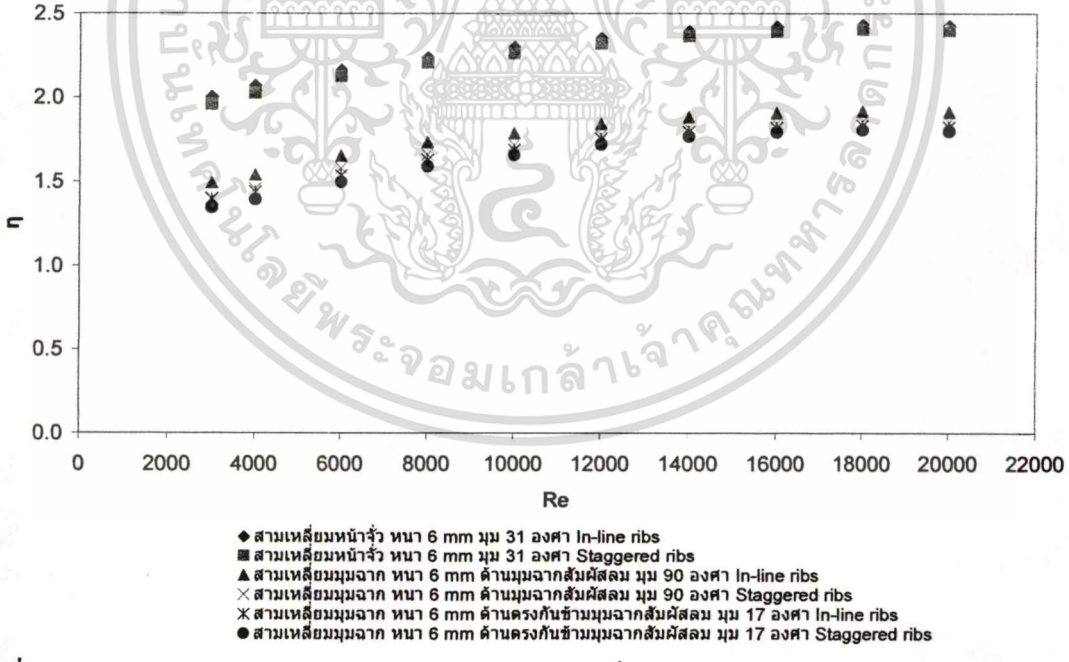


รูปที่ 9.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 9.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ เมื่อค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบของครีบมุมต่างๆ เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การทำให้พื้นที่ผิวภายในท่อขรุขระหรือติดครีบที่ผิวภายในท่อเพื่อให้อากาศเกิดความปั่นป่วนขึ้น เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 9.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบมุม 31 องศา มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 2.28 และ 2.25 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบมุม 90 องศา มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 1.77 และ 1.70 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบมุม 17 องศา มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 1.67 และ 1.64 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ

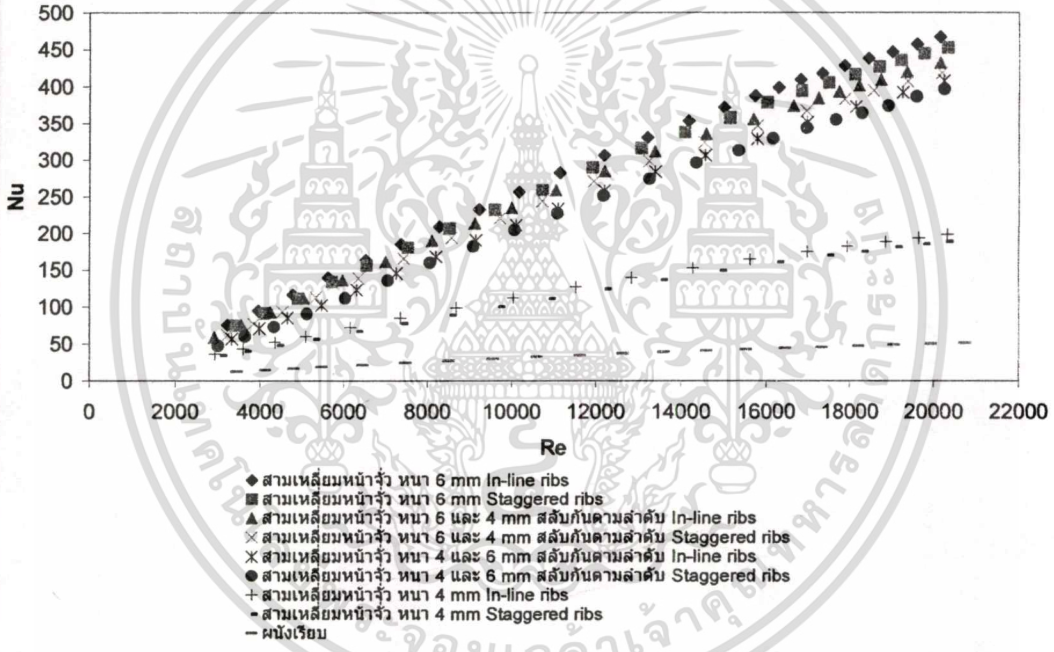


รูปที่ 9.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบมุมต่างๆ มีความหนา 6 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.5 อิทธิพลการจัดวางครีบ

ในรูปที่ 9.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ เมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์มากที่สุด ตามด้วยครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 และ 4 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ และ 4 และ 6 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 มิลลิเมตร และท่อที่มีผนังเรียบ ซึ่งมีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์ลดลงตามลำดับ การติดตั้งครีบแบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์มากกว่าการติดตั้งครีบแบบมีแนวเยื้อง

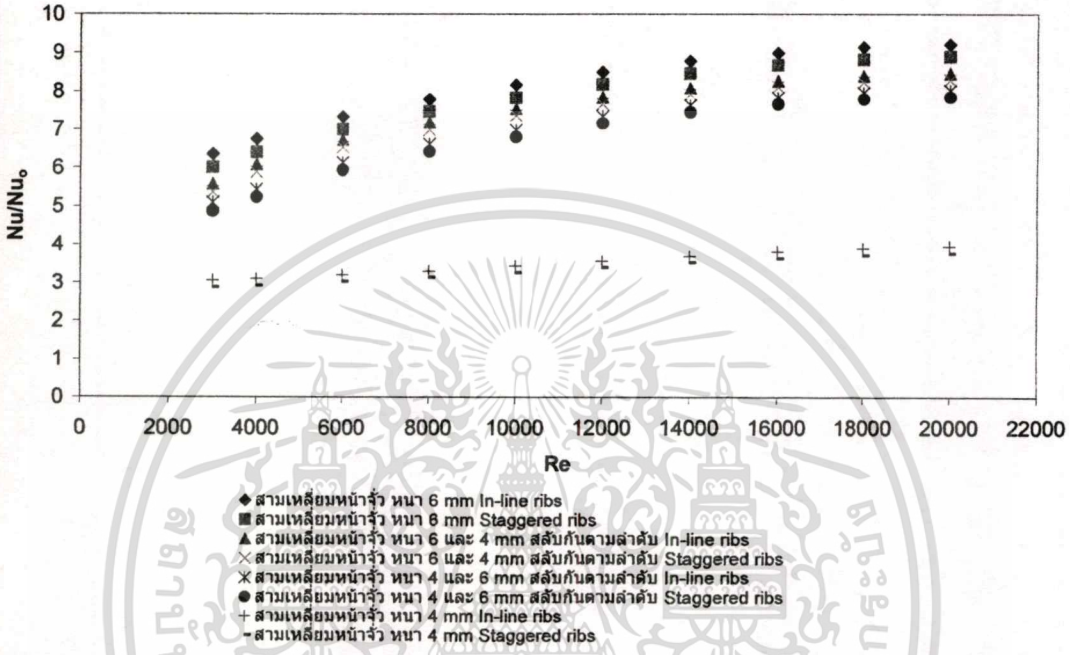


รูปที่ 9.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

ในรูปที่ 9.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 8.11 และ 7.78 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 และ 4 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 7.43 และ 7.24 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

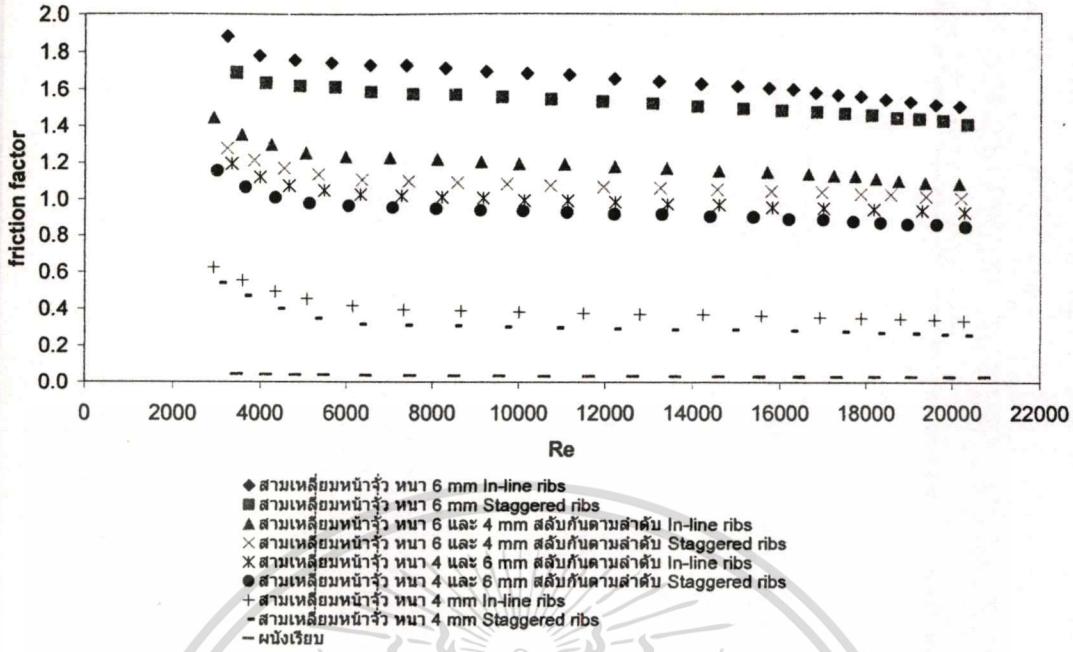
ตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 และ 6 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 6.91 และ 6.73 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 มิลลิเมตร มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 3.50 และ 3.32 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ



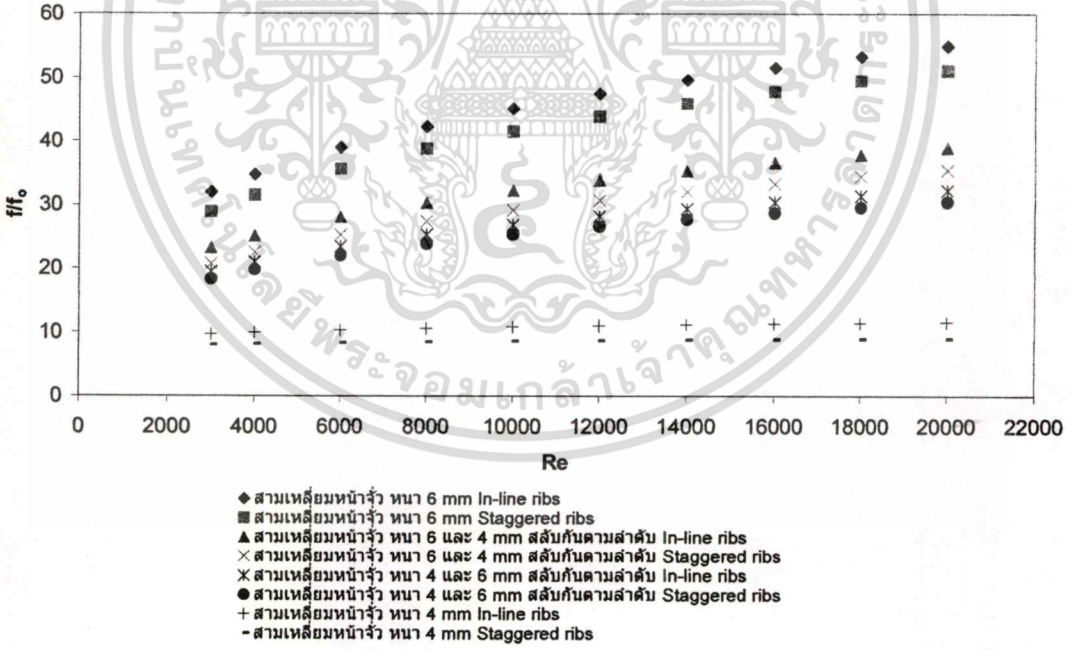
รูปที่ 9.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

ในรูปที่ 9.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ มีค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น ท่อที่มีผนังเรียบมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุด ตามด้วยครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 มิลลิเมตร ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 และ 6 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ และ 6 และ 4 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามลำดับ การติดตั้งครีบแบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่าการติดตั้งครีบแบบมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



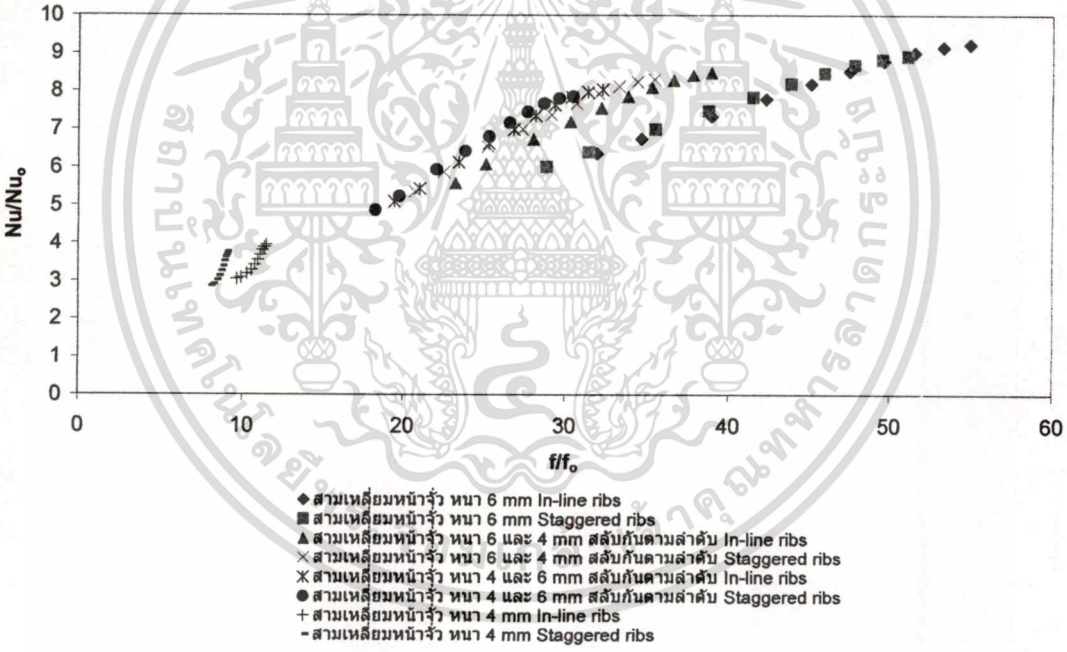
รูปที่ 9.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง



รูปที่ 9.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 9.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 44.97 และ 41.42 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 และ 4 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 32.12 และ 29.07 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 และ 6 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 26.74 และ 25.20 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 มิลลิเมตร มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 10.75 และ 8.57 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ



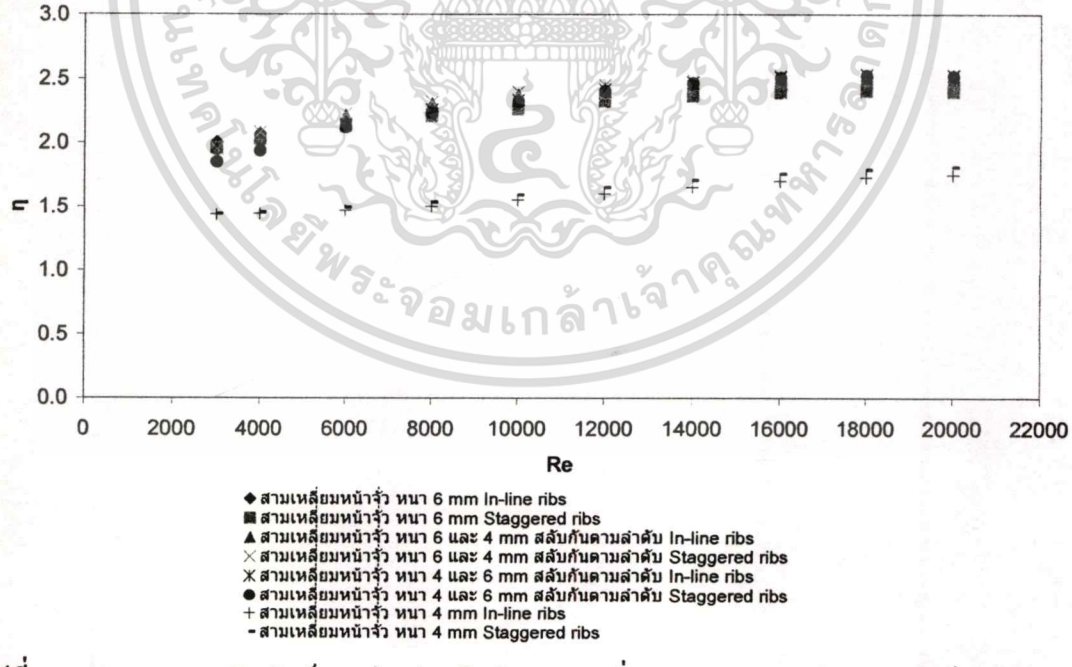
รูปที่ 9.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

ในรูปที่ 9.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ เมื่อค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบของครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การทำให้พื้นที่ผิวภายในท่อขรุขระหรือติดครีบที่ผิวภายในท่อเพื่อให้อากาศเกิดความปั่นป่วนขึ้น เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 9.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 2.28 และ 2.25 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 และ 4 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 2.33 และ 2.35 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 และ 6 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 2.31 และ 2.29 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 มิลลิเมตร มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 1.58 และ 1.62 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ

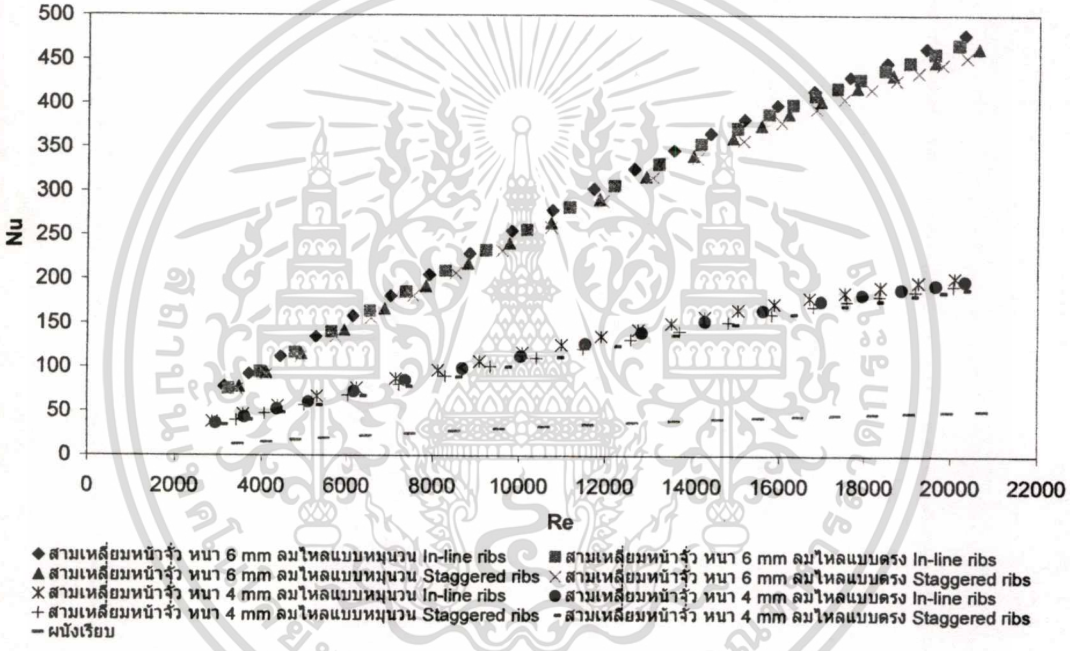


รูปที่ 9.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.6 อิทธิพลลมไหลแบบหมุนวน

ในรูปที่ 9.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ เมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างท่อที่มีครีบ โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน จะได้ว่าท่อที่มีครีบ โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน ทำให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มมากขึ้น การติดตั้งครีบแบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์มากกว่าการติดตั้งครีบแบบมีแนวเยื้อง

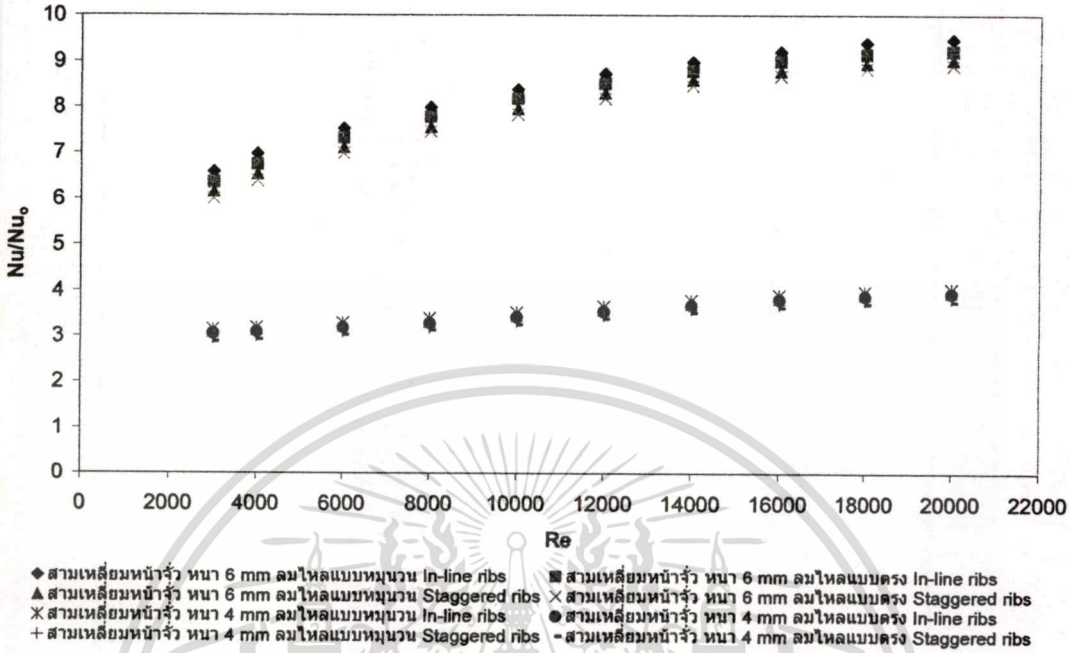


รูปที่ 9.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน

ในรูปที่ 9.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 8.33 และ 7.91 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความหนา 4 มิลลิเมตร โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 3.60 และ 3.40 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ



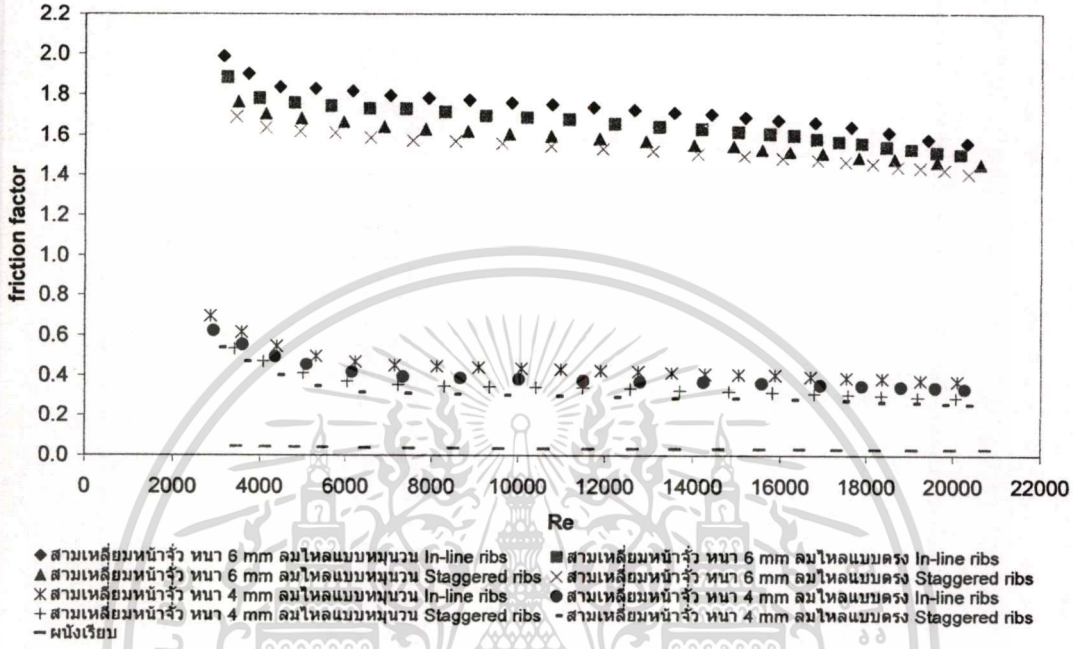
รูปที่ 9.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องโดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน

ในรูปที่ 9.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องโดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ มีค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างท่อที่มีครีบ โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน จะได้ว่าท่อที่มีครีบ โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน ทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น การติดตั้งครีบแบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่าการติดตั้งครีบแบบมีแนวเยื้อง

ในรูปที่ 9.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 46.58 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

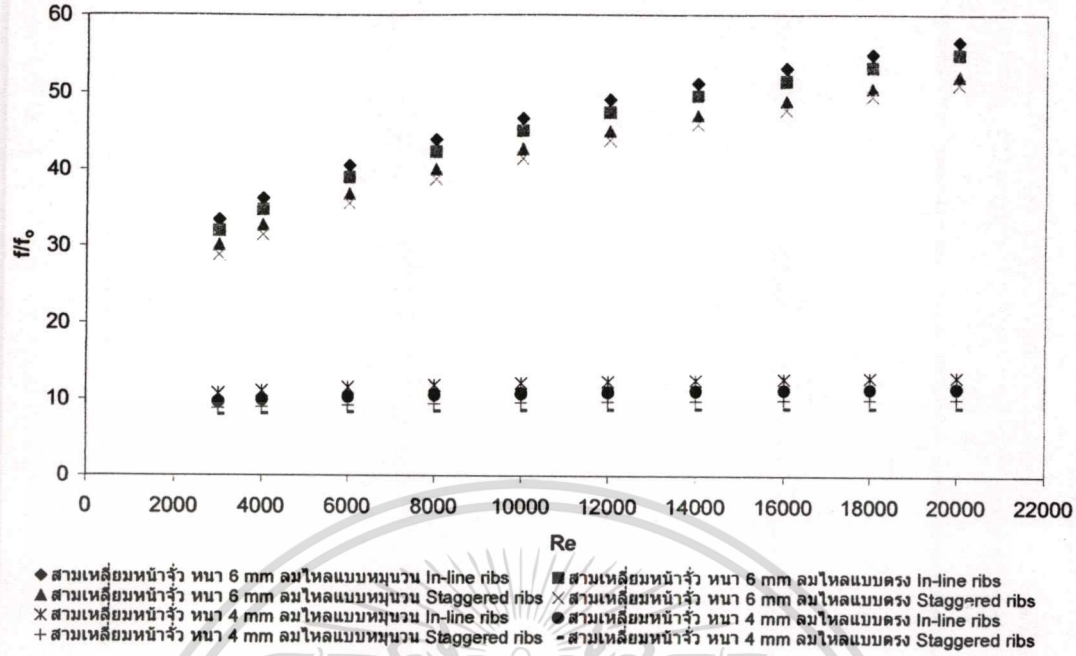
42.63 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 มิลลิเมตร โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 12.08 และ 9.55 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ



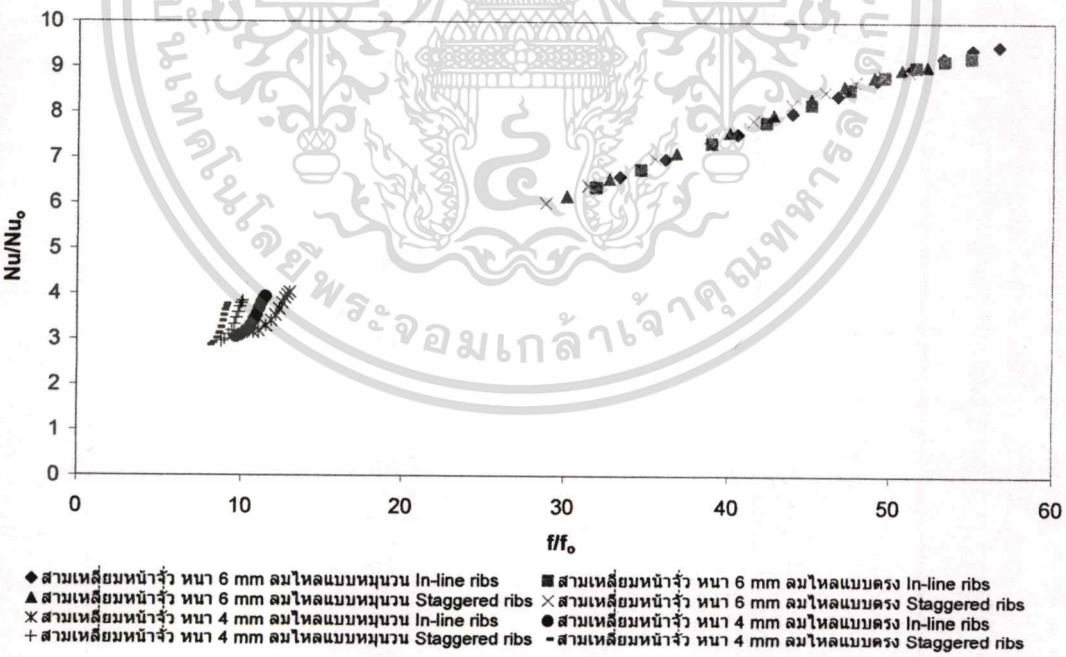
รูปที่ 9.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน

ในรูปที่ 9.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ เมื่อค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบของครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การทำให้พื้นที่ผิวภายในท่อขรุขระหรือติดครีบที่ผิวภายในท่อเพื่อให้อากาศเกิดความปั่นป่วนขึ้น เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น และผลของท่อที่มีครีบรวมทั้งลมไหลแบบหมุนวนภายในท่อโดยใช้แผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 360° ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



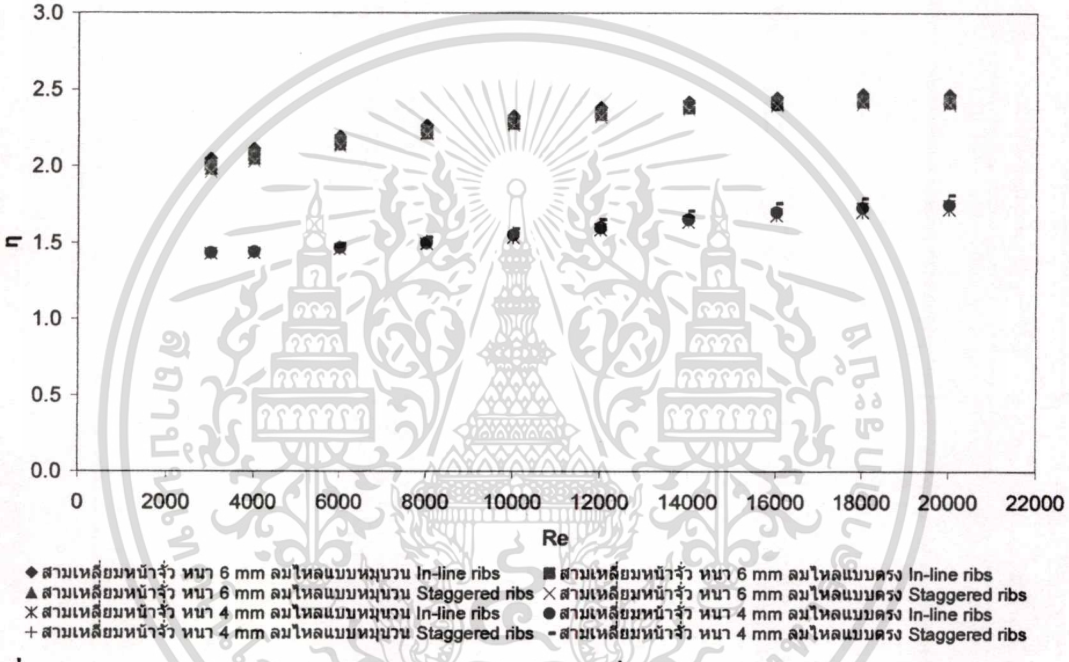
รูปที่ 9.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน



รูปที่ 9.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซิลล์นัมเบอร์ต่อนัสเซิลล์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 9.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 2.31 และ 2.26 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 มิลลิเมตร โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 1.57 และ 1.60 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ



รูปที่ 9.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน

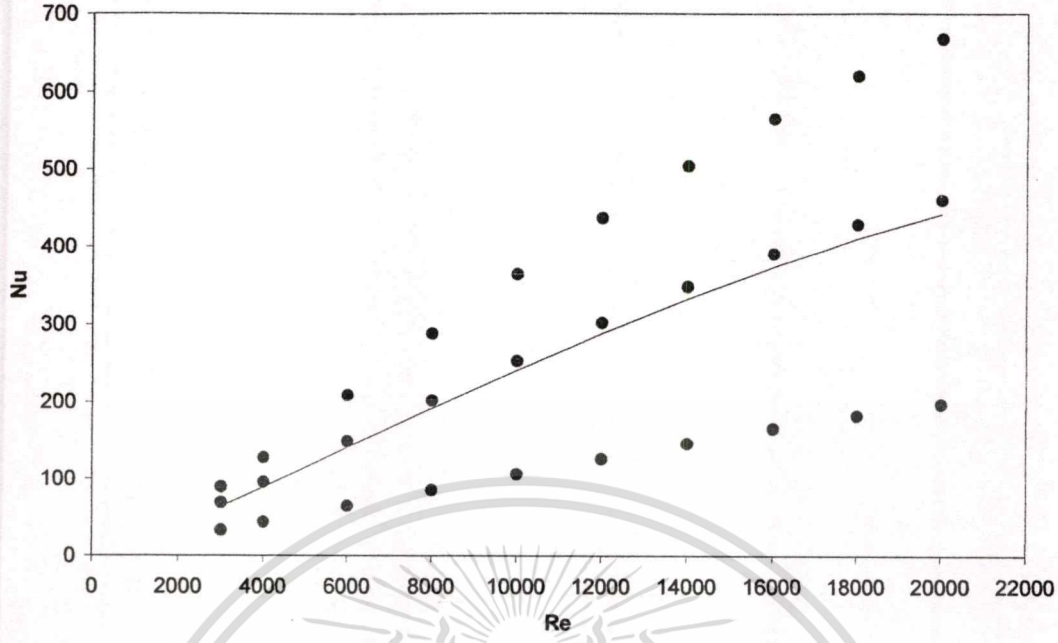
9.7 ความสัมพันธ์ตัวเลขนัสเซิลท์

ความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์ (Nu) กับเรโนลด์นัมเบอร์ (Re) และความสูงครีบต่อระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลอง (e/D) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

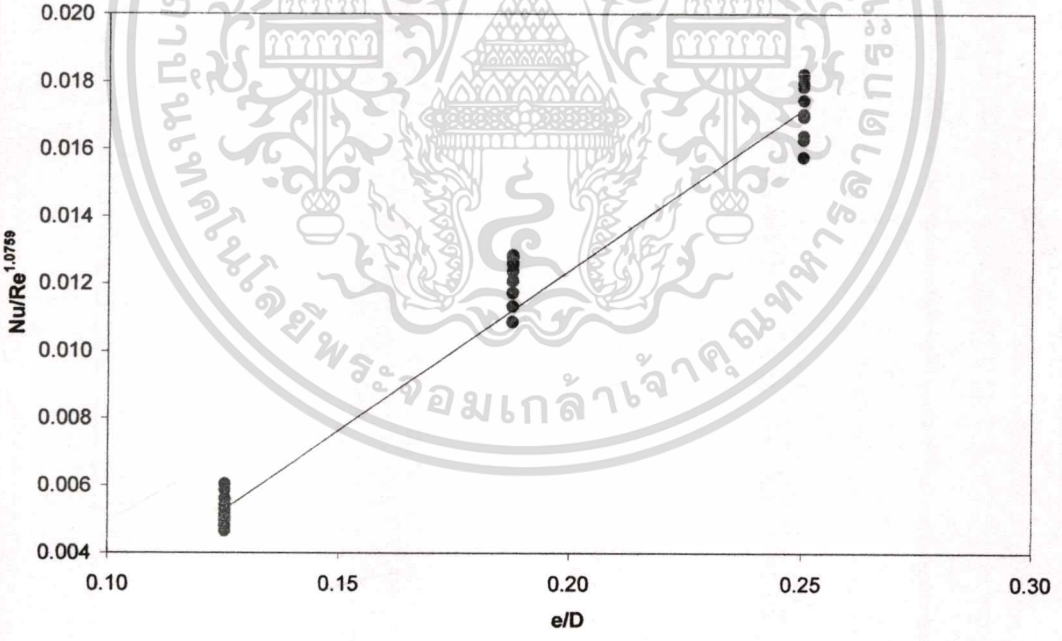
ในรูปที่ 9.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Nu = A\,\mathrm{Re}^{1.0759}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน



รูปที่ 9.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu / \mathrm{Re}^{1.0759}$ กับ e/D กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน

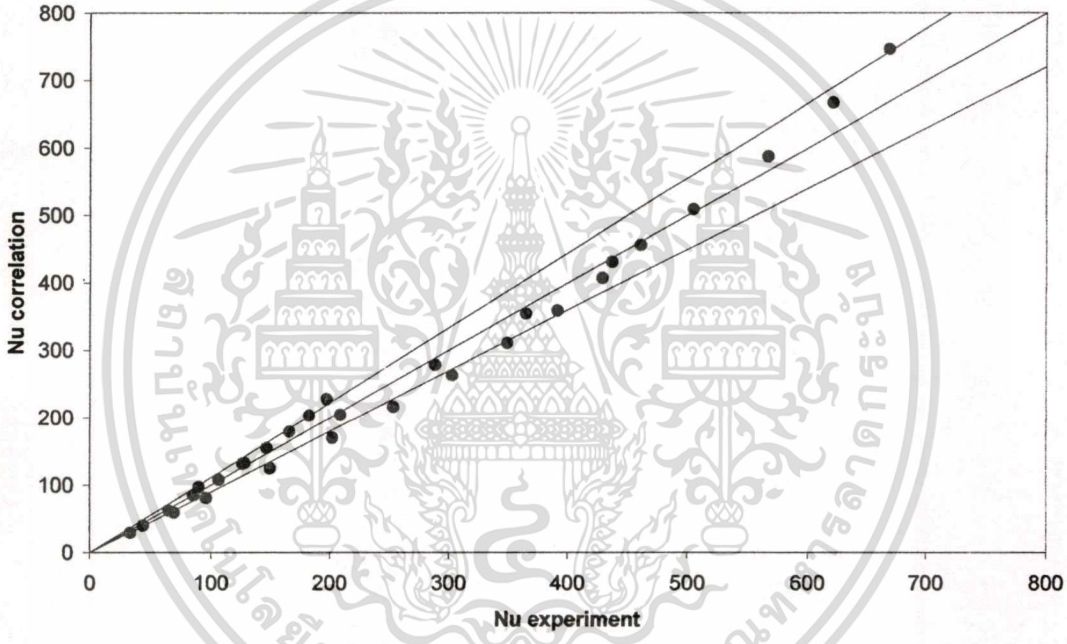
โดย A คือค่าคงที่ ในรูปที่ 9.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu / \mathrm{Re}^{1.0759}$ กับ e/D กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Nu}{\mathrm{Re}^{1.0759}} = 0.1893\left(\frac{e}{D}\right)^{1.7129}$$

ดังนั้น $$Nu = 0.1893\,\mathrm{Re}^{1.0759}\left(\frac{e}{D}\right)^{1.7129}$$

โดยมีขอบเขตในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re = 3000 – 20000 ในรูปที่ 9.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากความสัมพันธ์กับค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากการทดลอง กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน พบว่าสมการดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ±10%



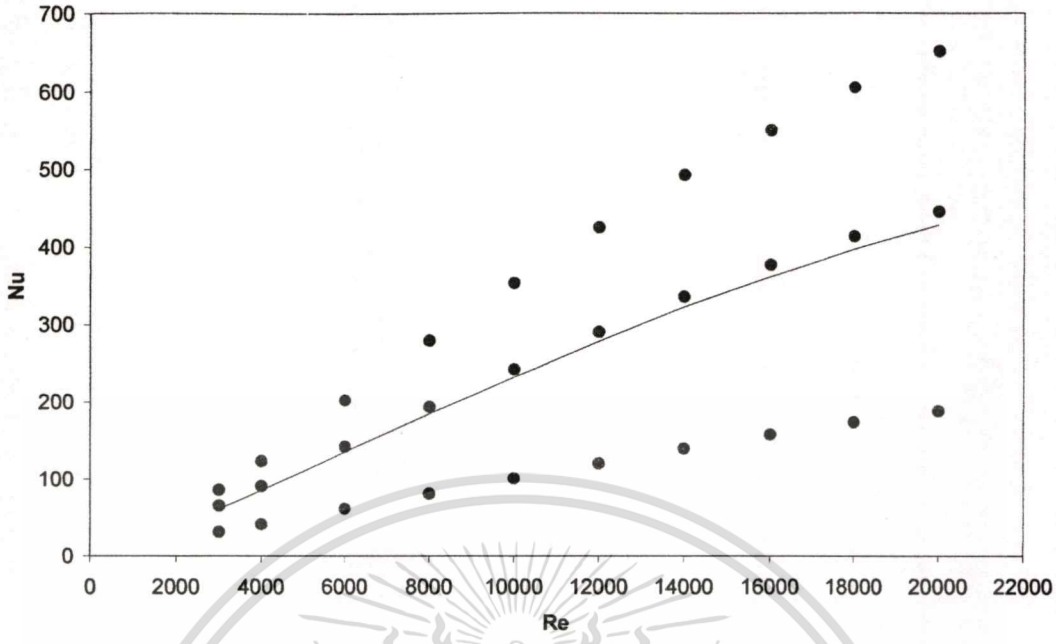
รูปที่ 9.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากความสัมพันธ์กับค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากการทดลอง กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์ (Nu) กับเรโนลด์นัมเบอร์ (Re) และความสูงครีบต่อระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลอง (e/D) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

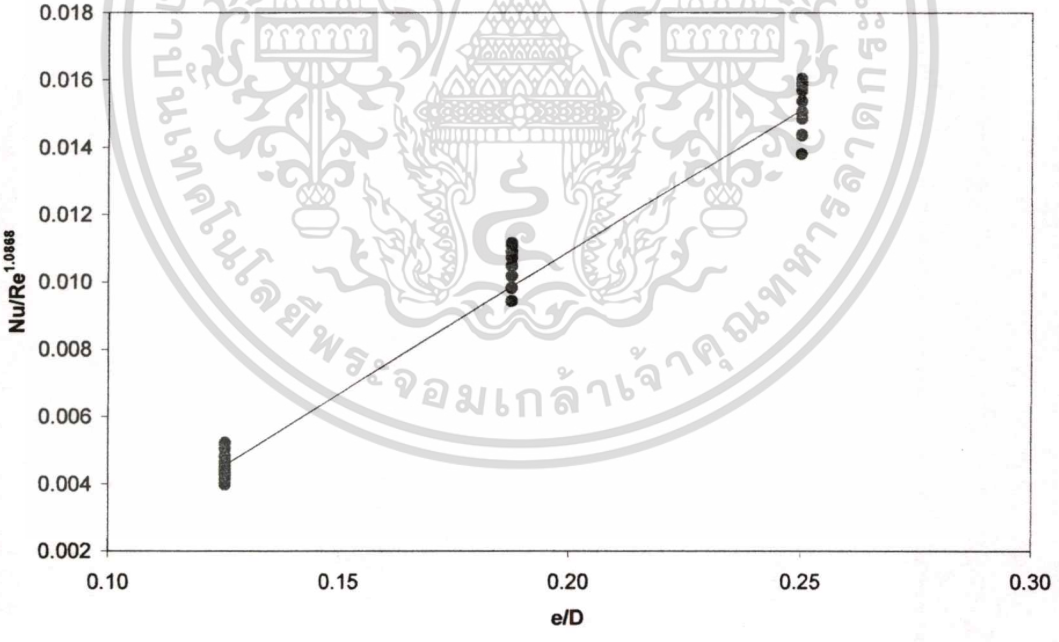
ในรูปที่ 9.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Nu = A\,\mathrm{Re}^{1.0868}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง



รูปที่ 9.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu / \mathrm{Re}^{1.0868}$ กับ e/D กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง

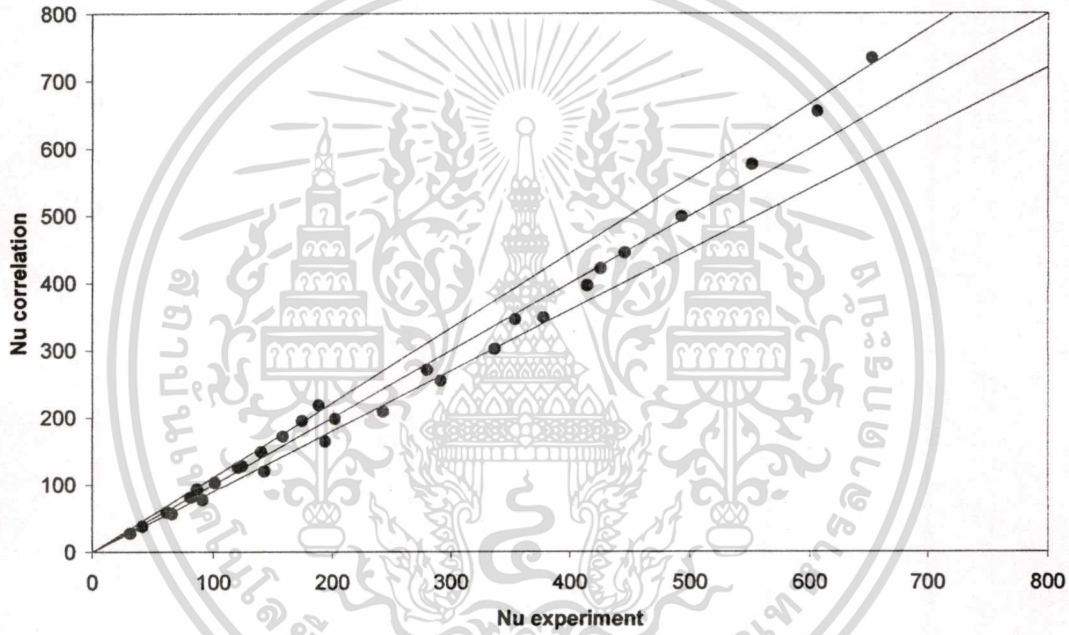
โดย A คือค่าคงที่ ในรูปที่ 9.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu / \mathrm{Re}^{1.0868}$ กับ e/D กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Nu}{\mathrm{Re}^{1.0868}} = 0.1747\left(\frac{e}{D}\right)^{1.7453}$$

ดังนั้น $$Nu = 0.1747\,\mathrm{Re}^{1.0868}\left(\frac{e}{D}\right)^{1.7453}$$

โดยมีขอบเขตในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re = 3000 – 20000 ในรูปที่ 9.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากความสัมพันธ์กับค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากการทดลอง กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง พบว่าสมการดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ±10%



รูปที่ 9.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากความสัมพันธ์กับค่านัสเซิลล์นัมเบอร์จากการทดลอง กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง

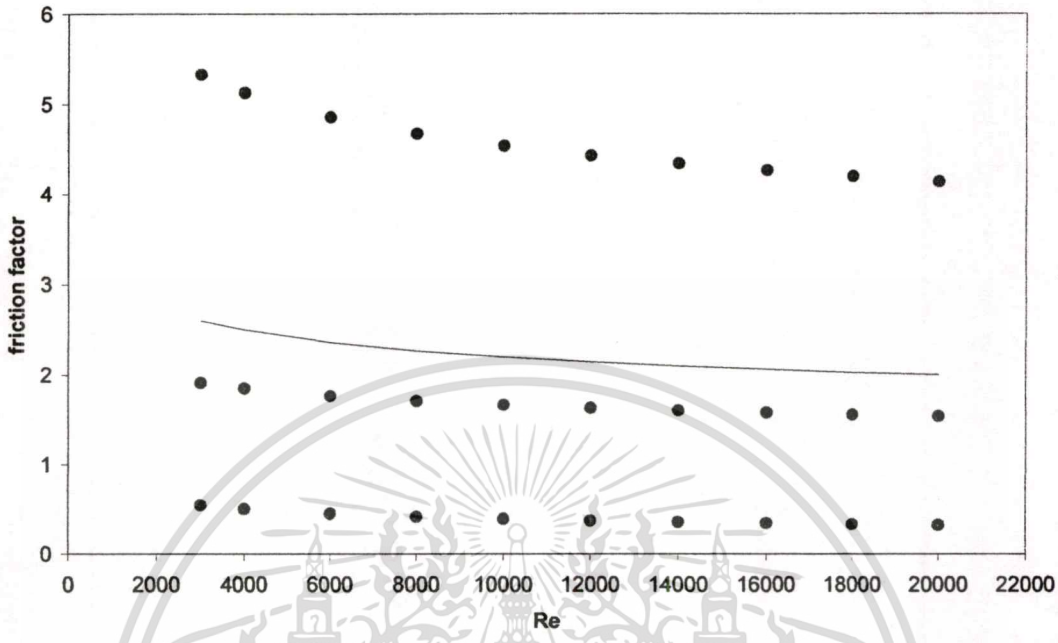
9.8 ความสัมพันธ์ตัวประกอบเสียดทาน

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน (f) กับเรโนลด์นัมเบอร์ (Re) และความสูงครีบต่อระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลอง (e/D) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

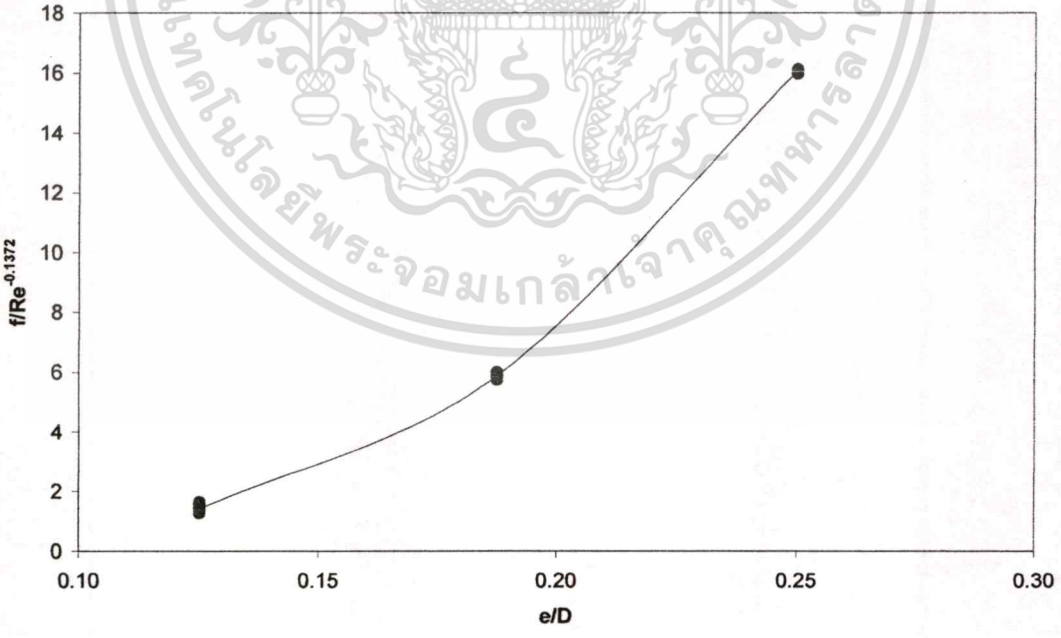
ในรูปที่ 9.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = A\,\mathrm{Re}^{-0.1372}$$



รูปที่ 9.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน



รูปที่ 9.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f / \mathrm{Re}^{-0.1372}$ กับ e/D กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

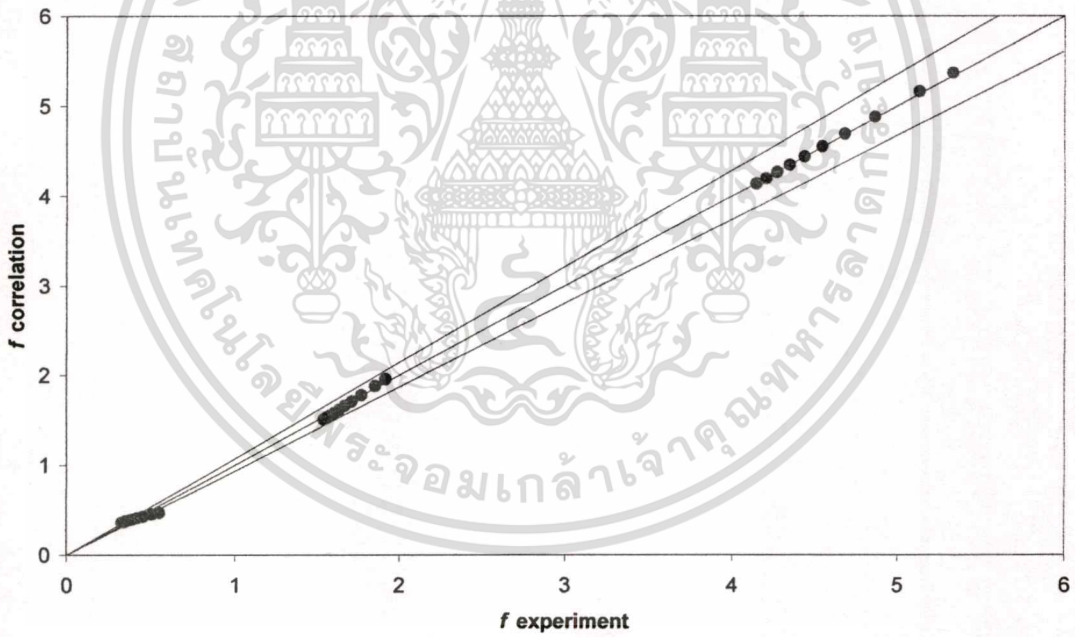
โดย A คือค่าคงที่ ในรูปที่ 9.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f / \mathrm{Re}^{-0.1372}$ กับ e/D กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{f}{\mathrm{Re}^{-0.1372}} = 2069.8\left(\frac{e}{D}\right)^{3.5033}$$

ดังนั้น

$$f = 2069.8\,\mathrm{Re}^{-0.1372}\left(\frac{e}{D}\right)^{3.5033}$$

โดยมีขอบเขตในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re = 3000 – 20000 ในรูปที่ 9.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทานจากความสัมพันธ์กับค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลอง กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน พบว่าสมการดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ±6.67%



รูปที่ 9.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทานจากความสัมพันธ์กับค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลอง กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน (f) กับเรโนลด์นัมเบอร์ (Re) และความสูงครีบต่อระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลอง (e/D) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 9.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

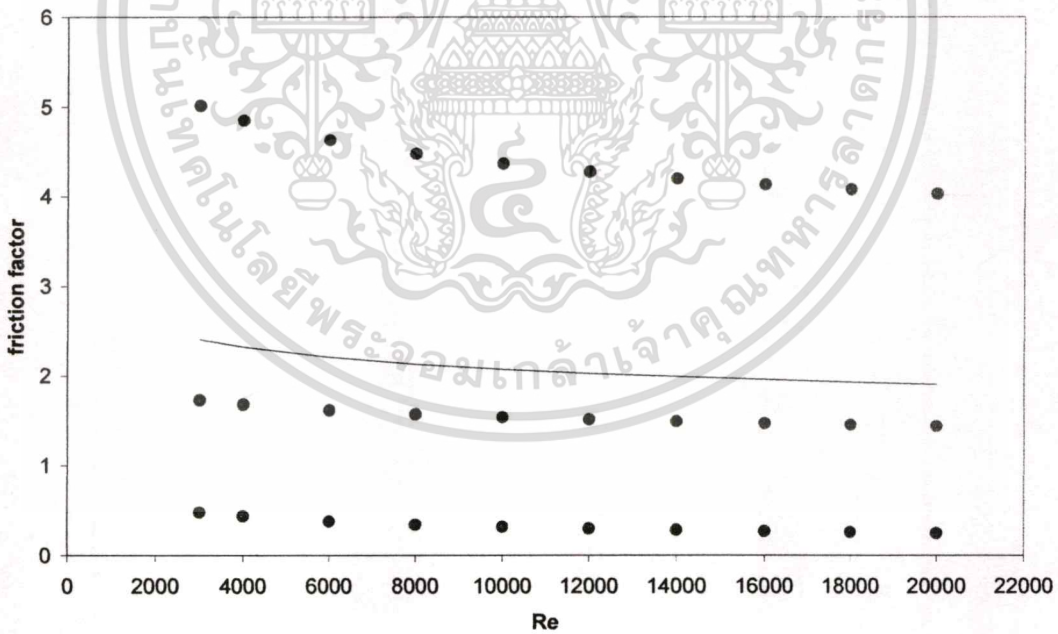
$$f = A\,\mathrm{Re}^{-0.1235}$$

โดย A คือค่าคงที่ ในรูปที่ 9.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f/\mathrm{Re}^{-0.1235}$ กับ e/D กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{f}{\mathrm{Re}^{-0.1235}} = 2525.7\left(\frac{e}{D}\right)^{3.7581}$$

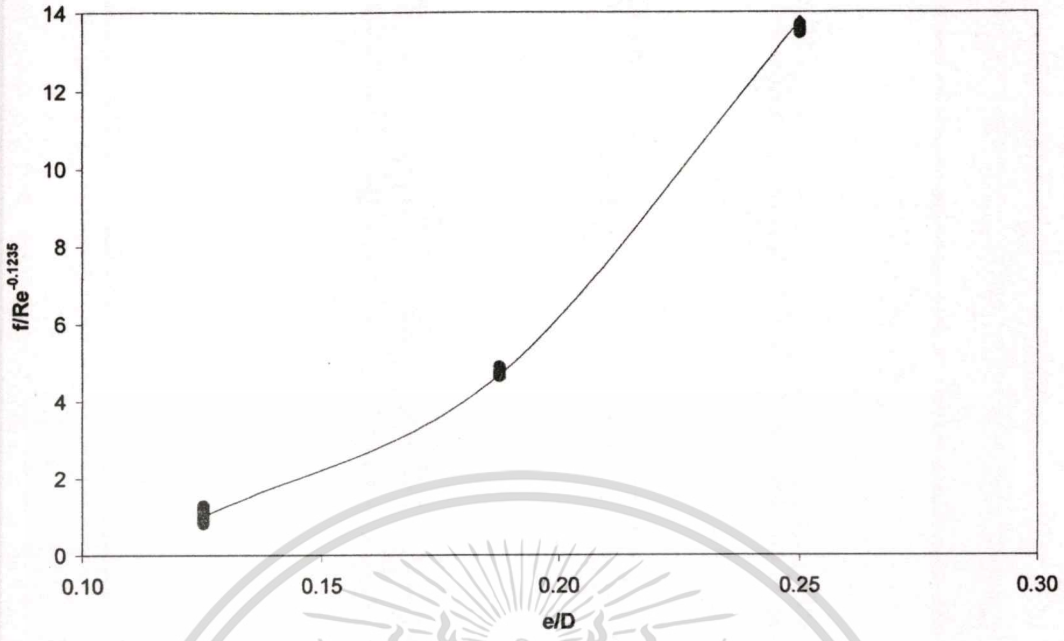
ดังนั้น

$$f = 2525.7\,\mathrm{Re}^{-0.1235}\left(\frac{e}{D}\right)^{3.7581}$$

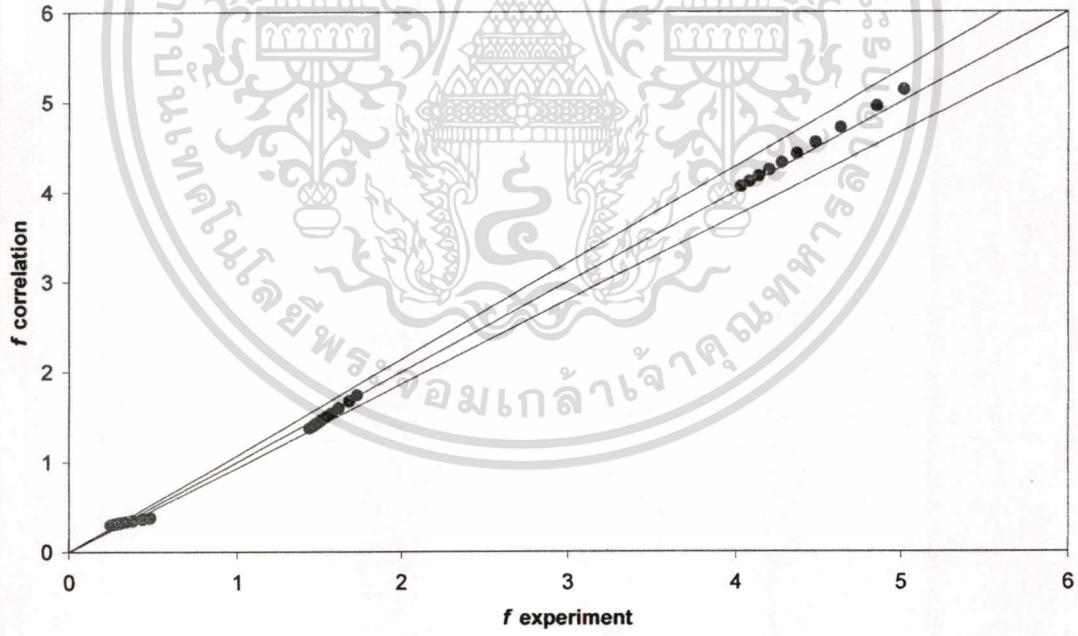


รูปที่ 9.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเรโนลด์นัมเบอร์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f / \mathrm{Re}^{-0.1235}$ กับ e/D กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว มีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง



รูปที่ 9.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทานจากความสัมพันธ์กับค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลอง กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง

โดยมีขอบเขตในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re = 3000 – 20000 ในรูปที่ 9.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทานจากความสัมพันธ์กับค่าตัวประกอบเสียดทานจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบแบบมีแนวเยื้อง พบว่าสมการดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ±6.67%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 10
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

10.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบและตัวสร้างกระแสวนสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การศึกษาและออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและตัวสร้างกระแสวน จากการทดลองพบว่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อโดยการติดครีบที่ผิวภายในท่อเพื่อให้เกิดเทอร์บูเลนท์ ช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และผลของท่อที่มีครีบรวมทั้งลมไหลแบบหมุนวนภายในท่อโดยใช้แผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 360° ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น การติดครีบและการใส่แผ่นบิด จะส่งผลดีต่อการถ่ายเทความร้อน 2 ประการคือ ประการแรก จะช่วยทำให้เกิดการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างอากาศที่ถูกจ่ายเข้าภายในชุดทดลองกับอากาศที่ผิวครีบมากขึ้น ประการที่สอง เป็นการเพิ่มระยะเวลาในการรับความร้อนที่ผิวครีบให้นานมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น

2. การศึกษาผลของลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวนภายในท่อ จากการทดลองพบว่าการไหลแบบหมุนวน เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างท่อที่มีครีบ โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน จะได้ว่าท่อที่มีครีบ โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น

3. การศึกษาผลของรูปร่างครีบและตำแหน่งครีบ โดยติดครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ เมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบทุกแบบเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การติดครีบลักษณะต่างๆ ภายในชุดทดลอง ทำให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 8 มิลลิเมตร มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์มากที่สุด ตามด้วยครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร และ 6 และ 4 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ด้านมุมฉากสัมผัสลม ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 และ 6 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสลม ครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความหนา 6 มิลลิเมตร ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 มิลลิเมตร และท่อที่มีผนังเรียบ ซึ่งมีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์ลดลงตามลำดับ จากการทดลองพบว่าครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 8 มิลลิเมตร มีค่านัสเซิลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 11.50 และ 11.18 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ และมีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 2.32 และ 2.28 เท่า สำหรับการติดครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องตามลำดับ การติดตั้งครีบลักษณะต่างๆ แบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์มากกว่าการติดตั้งครีบแบบมีแนวเยื้องเมื่อเทียบกับครีบรูปร่างเดียวกัน ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่ใช้ในการทดลองมีขอบเขตการศึกษาอัตราส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองในช่วงอัตราส่วน $e/D < 0.5$ พบว่าที่อัตราส่วน $e/D = 0.5$ ความสูงครีบเท่ากับ 1.6 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองเท่ากับ 3.2 เซนติเมตร เมื่อติดครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกัน จะไม่ทำให้เกิดการไหลของอากาศผ่านชุดทดลอง

4. ในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนท์ ครีบทุกแบบมีค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น การติดครีบลักษณะต่างๆ ภายในชุดทดลอง ทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น ท่อที่มีผนังเรียบมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุด ตามด้วยครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 มิลลิเมตร, 4 และ 6 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ, 6 และ 4 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับ และ 6 มิลลิเมตร ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสลม และด้านมุมฉากสัมผัสลม ครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความหนา 6 มิลลิเมตร และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 8 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามลำดับ การติดตั้งครีบลักษณะต่างๆ แบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่าการติดตั้งครีบแบบมีแนวเยื้องเมื่อเทียบกับครีบรูปร่างเดียวกัน

10.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบและตัวสร้างกระแสวนเป็นงานวิจัย ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวนภายในท่อ และศึกษาผลของรูปร่างครีบและตำแหน่งครีบ โดยติดครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง ฉะนั้นแล้วควรจะมีการศึกษาถึงตัวแปรอื่นๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบให้ได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น เช่น

1. ศึกษาถึงระยะพิตช์อื่นๆ ของครีบ
2. ศึกษาถึงค่า aspect ratio อื่นๆ ของชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
3. ศึกษาถึงการใช้ครีบรูปอื่นๆ เช่น รูปพาราโบลิค
4. ศึกษาถึงการใช้ครีบที่มีร่อง (Rib-grooved)
5. ศึกษาถึงชุดทดลองรูปทรงกระบอก
6. ศึกษาถึงขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] ชัชวาล เขียวละลิ้ม, ณัฐวุฒิ หลิ่วพิริยะวงศ์ และนนทศักดิ์ ทองพุ่มพฤกษา. 2544. **การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.** ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[2] พงษ์เจต พรหมวงศ์. 2542. **การถ่ายเทความร้อน.** ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 167-252.

[3] Ahn, S.W. 2001. **The effects of roughness types on friction factors and heat transfer in roughened rectangular duct.** Int. Comm. Heat Mass Transfer Vol. 28, pp. 933-942.

[4] Benlu and Pei-Xue Jiang. 2005. **Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a rectangular channel with angled ribs.** Int. J. Experimental Thermal and Fluid Science.

[5] Carl-Olof Olsson and Bengt Sunden. 1998. **Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels.** Experimental Thermal and Fluid Science 16, pp. 349-365.

[6] Cengel, Yunus A. 1998. **Heat Transfer: A Practical Approach.** McGraw-Hill, New York, pp. 349-394.

[7] Fox, Robert W. and Alan T. McDonald. 1998. **Introduction to Fluid Mechanics.** Wiley, New York, pp. 332-395.

[8] Giovanni Tanda. 2004. **Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs.** Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 47, pp. 229-243.

[9] Han, J.C., L.R. Glicksman, and W.M. Rohsenow. 1978. **An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces.** Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 21, pp. 1143-1156.

[10] Han, J.C., Y.M. Zhang, and C.P. Lee. 1991. **Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs.** ASME J. Heat Transfer Vol. 113, pp. 590-596.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Han, J.C., J.J. Huang, and C.P. Lee. 1993. **Augmented heat transfer in square channels with wedge-shaped and delta-shaped turbulence promoters.** J. Enhanced Heat Transfer Vol. 1, pp. 37-52.

[12] Holman, J.P. 1990. **Heat Transfer.** McGraw-Hill, New York, pp. 217-321.

[13] Incropera, Frank P. and David P. Dewitt. 1996. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** John Wiley & Sons, New York, pp. 419-461.

[14] Jaurker, A.R., J.S. Saini, and B.K. Gandhi. 2005. **Heat transfer and friction characteristics of rectangular solar air heater duct using rib-grooved artificial roughness.** Solar Energy.

[15] Metzger, D.E., C.S. Fan, and Y. Yu. 1990. **Effects of Rib Angle and Orientation on Local Heat Transfer in Square Channels with Angled Roughness Ribs.** in: R.K. Shah, A.D. Kraus, D.E. Metzger, Compact Heat Exchangers, Hemisphere, Washington.

[16] Munson, Bruce R., Donald F. Young, and Theodore H. Okiishi. 1990. **Fundamentals of Fluid Mechanics.** John Wiley & Sons, New York, pp. 465-547.

[17] Ozisik, M.N. 1985. **Heat Transfer: A Basic Approach.** McGraw-Hill, New York, pp. 281-338.

[18] Rajendra Karwa. 2003. **Studies of Augmented Heat Transfer and Friction in Asymmetrically Heated Rectangular Ducts with Ribs on The heated wall in Transverse, Inclined, V-Continuous and V-Discrete Pattern.** Int. Comm. Heat Mass Transfer Vol. 30, pp. 241-250.

[19] Taslim, M.E., T. Li, and D.M. Kercher. 1996. **Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped, and discrete ribs on two opposite walls.** ASME J. Turbomachinery Vol. 118, pp. 20-28.

[20] Zhang, Y.M., W.Z. Gu, and J.C. Han. 1994. **Heat transfer and friction in rectangular channels with ribbed or ribbed-grooved walls.** ASME J. Heat Transfer Vol. 116, pp. 58-65.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

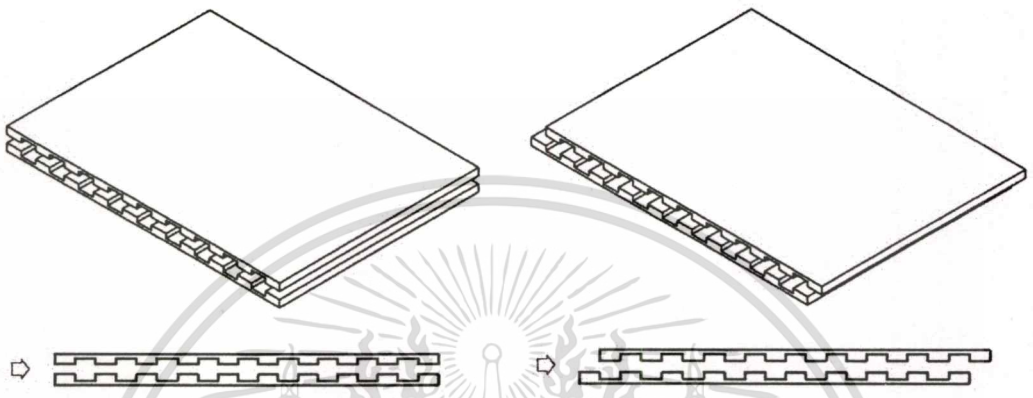
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

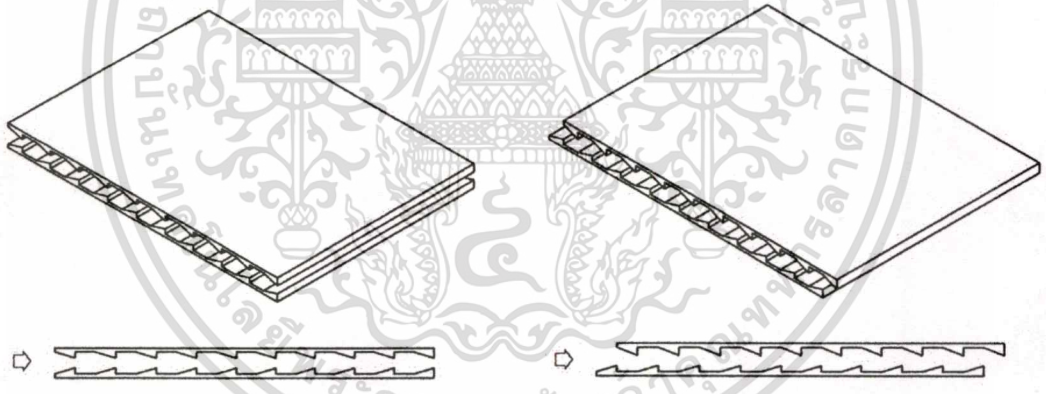
ครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครีบทุกแบบทำจากอลูมิเนียมมีความกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างแต่ละครีบ 2 เซนติเมตร และมีระยะพิตต์ 4 เซนติเมตร ครีบต่างๆ เป็นส่วนหนึ่งของผนังที่ยื่นออกมาคือครีบและผนังเป็นเนื้อเดียวกันจะไม่มีความต้านทานของหน้าสัมผัสที่ฐานครีบ แผ่นครีบถูกติดกับผิวท่อแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แผ่นครีบแต่ละแผ่นจะมีครีบจำนวน 10 ครีบ

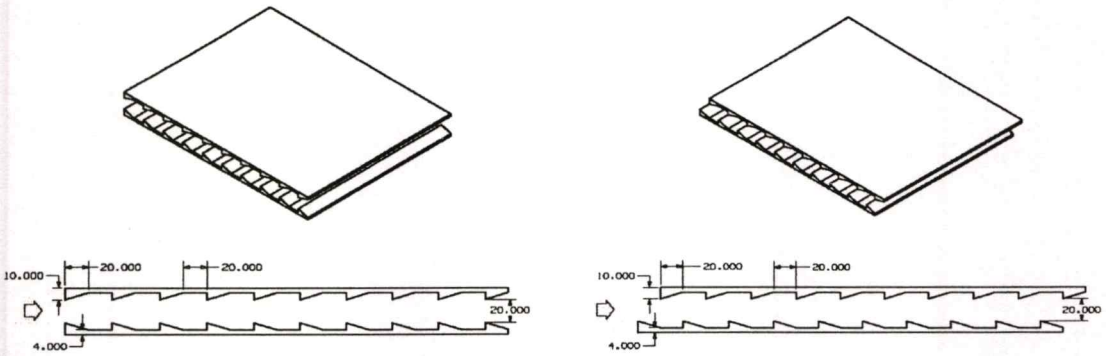


รูปที่ ก-1 แสดงครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความหนา 6 มิลลิเมตร แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

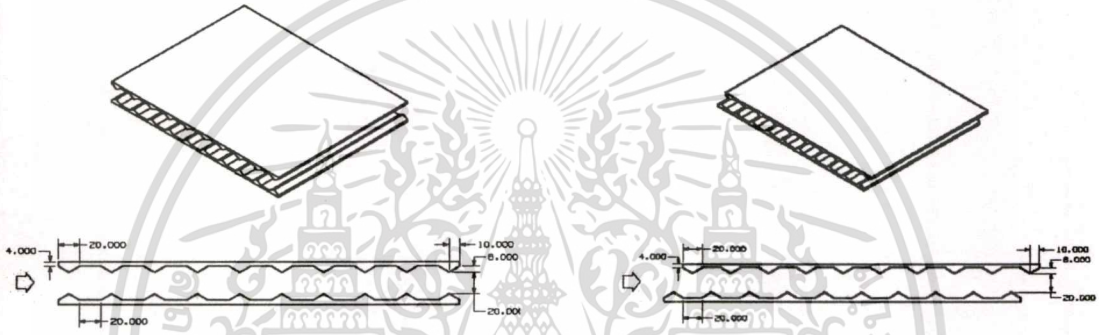


รูปที่ ก-2 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้พื้นผิวครีบด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสกับทิศทางการไหลของลม

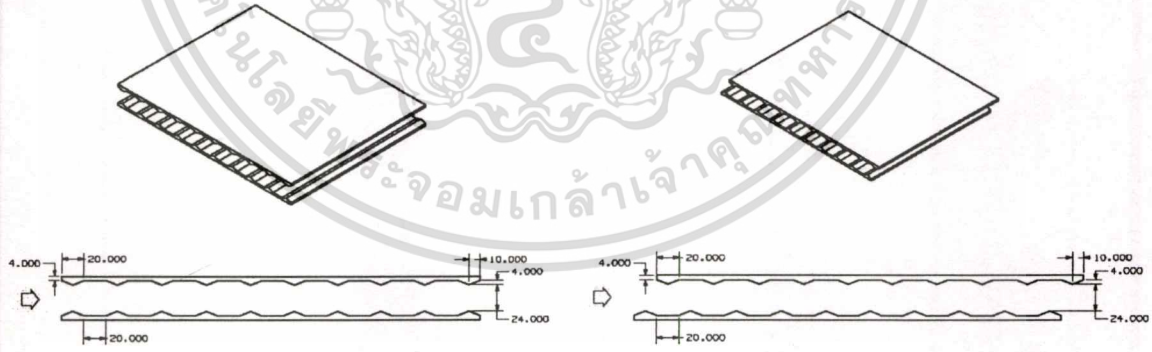
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากมีความหนา 6 มิลลิเมตร แบบมีแนวเดียวกัน และมีแนวเยื้อง โดยให้พื้นผิวครีบด้านมุมฉากสัมผัสกับทิศทางการไหลของลม

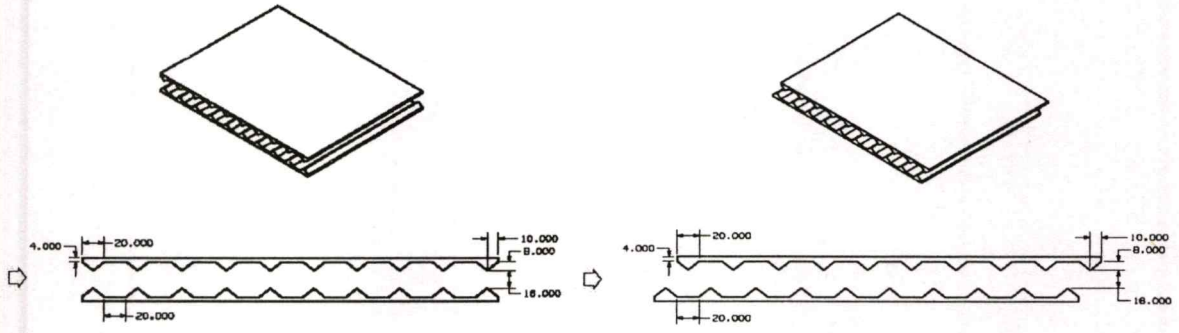


รูปที่ ก-4 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร แบบมีแนวเดียวกัน และมีแนวเยื้อง

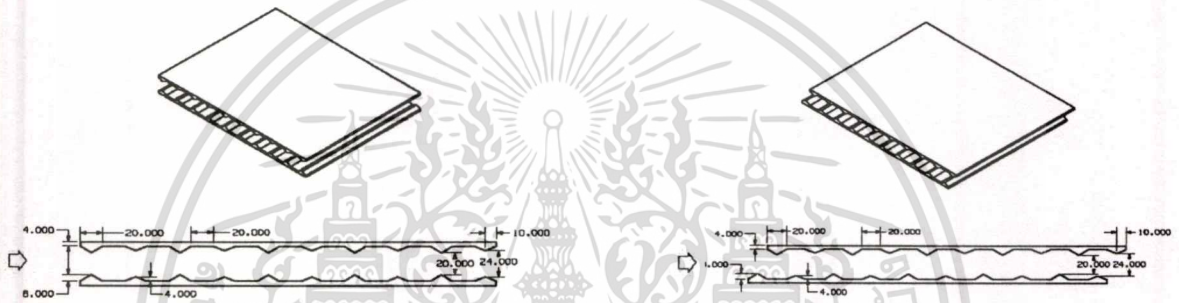


รูปที่ ก-5 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 มิลลิเมตร แบบมีแนวเดียวกัน และมีแนวเยื้อง

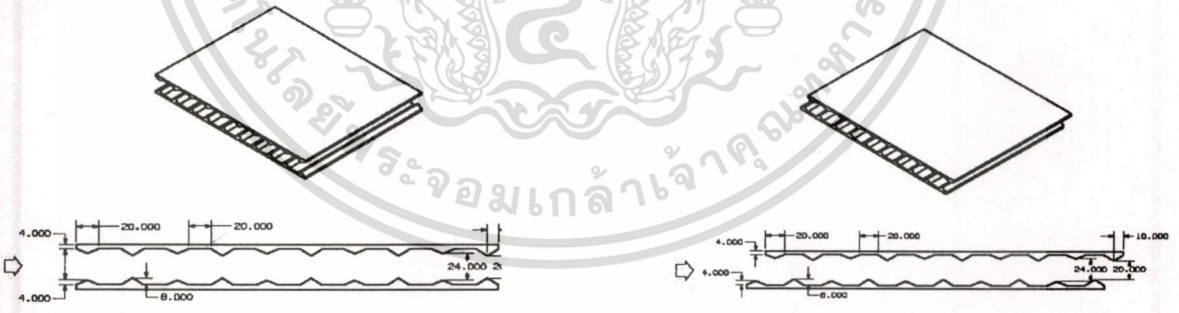
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-6 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 8 มิลลิเมตร แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง



รูปที่ ก-7 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 และ 4 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับตลอดความกว้างครีบ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง



รูปที่ ก-8 แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4 และ 6 มิลลิเมตร สลับกันตามลำดับตลอดความกว้างครีบ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

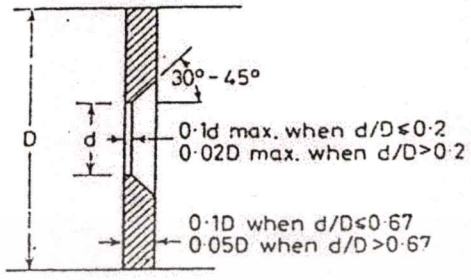
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ออริฟิส

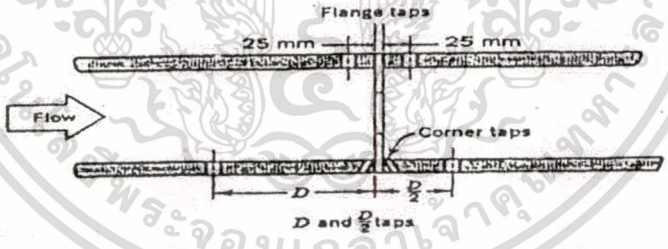
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออริฟิสชนิดต่างๆ คล้ายคลึงกัน สามารถอธิบายด้วยกันได้ แต่ละชนิดแตกต่างกันที่ pressure tapping ซึ่ง orifice มาตรฐานกำหนดดังนี้ รูปร่างลักษณะ (description) ออริฟิต (orifice) ได้แสดงหน้าตัดต่างๆ ดังรูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 Standard orifice plate

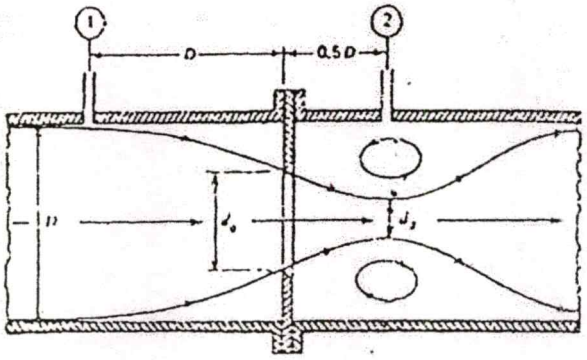
แผ่นออริฟิสเป็นแผ่นบางๆ ที่ถูกจับยึดระหว่างขอบของท่อ เนื่องจากมีรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายๆ ดังนั้นจึงมีราคาถูก และง่ายในการติดตั้ง หรือการย้ายตำแหน่ง แต่อย่างไรก็ตามขอบของแผ่นอาจจะมีการสึกกร่อนได้ อันเนื่องจากการชนของอนุภาคเล็กๆ ที่กระจายอยู่ในของไหล ข้อเสียอีกประการก็คือ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการขยายของด้านล่างของกระแส ทำให้มี head loss ถาวรที่สูงมาก จุดวัดความดันสำหรับออริฟิสนั้น สามารถกำหนดตำแหน่งได้หลายตำแหน่งดังรูปที่ ข-2 เนื่องจากตำแหน่งของจุดวัดความดันมีอิทธิพลต่อการหาสัมประสิทธิ์การไหล



รูปที่ ข-2 แสดงโครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิส

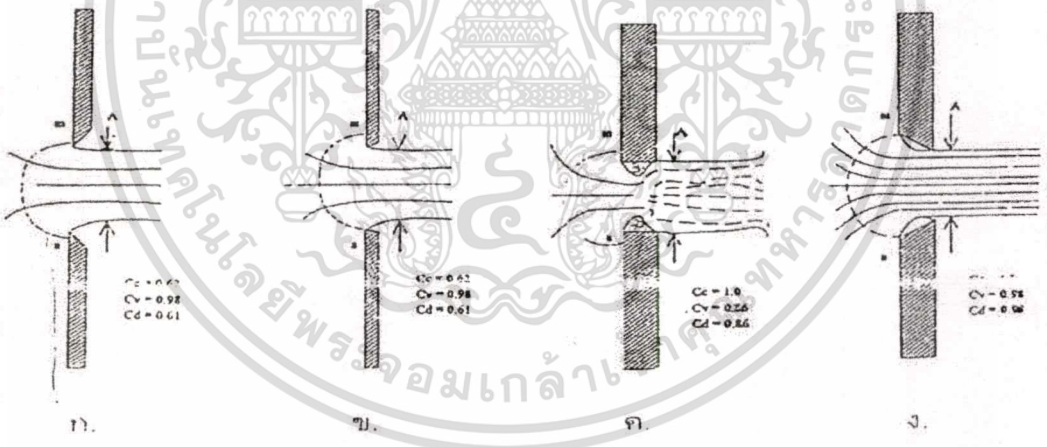
สำหรับการวัดอัตราการไหลของของไหลภายในท่อ และจัดได้ว่าออริฟิสเป็นเครื่องมือวัดที่กีดขวางการไหลของพื้นที่หน้าตัด ให้ของไหลไหลผ่านออริฟิสมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อดังรูปที่ ข-3 ดังนั้นเมื่อนำออริฟิสไปติดตั้งกับท่อ ซึ่งมีของไหลไหลผ่านจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมออริฟิส ซึ่งความดันตกคร่อมนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการไหล กล่าวคือถ้าอัตราการไหลมีค่าสูง ความดันตกคร่อมออริฟิสก็จะมีค่าสูง และถ้าอัตราการไหลมีค่าต่ำ ความดันตกคร่อมออริฟิสก็จะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปออริฟิสจะถูกนำไปใช้ในการหาอัตราการไหลที่สภาวะ Steady state เท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้วัดอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Dynamic Response)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-3 แสดงการไหลผ่านแผ่นออริฟิส (Orifice)

ในบรรดาเครื่องมือวัดอัตราการไหลทั้งหลาย ออริฟิสถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีผู้นำไปใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด ดังนั้นการทดลองชุดนี้จึงได้มีการนำเอาการวัดอัตราการไหลแบบออริฟิสมาใช้ ออริฟิสมาตรฐานที่มีขอบคมดังรูปที่ ข-4 ก. หรือเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ ข-4 ข. นั้นจะสัมผัสลำน้ำที่ไหลผ่านในลักษณะที่เป็นการสัมผัสแบบเส้น ส่วนออริฟิสดังรูปที่ ข-4 ค. และ ข-4 ง. นั้นไม่ใช้เป็นออริฟิสมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะลำน้ำที่ไหลผ่านรูออริฟิสนั้น ถูกกระทบจากความหนาของแผ่นวัตถุ กับความหยาบของผิว และรัศมีของความโค้ง ดังนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบเพื่อความถูกต้อง



รูปที่ ข-4 ออริฟิสแบบต่างๆ

ข้อดีของออริฟิสคือมีราคาต่ำกว่าเครื่องมือวัดชนิดอื่นๆ ที่อาศัยหลักการวัดเดียวกัน และสะดวกในการสร้างเพราะมีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อน รวมทั้งมีข้อมูลของการทำวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมในการวัดของไหล ที่มีเงื่อนไขแตกต่างอย่างมากมาย ของไหลเมื่อไหลผ่าน square-edged orifice ซึ่งเป็นออริฟิสที่นำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ จะมีทิศทางการไหลเป็นไปดังรูป สมมุติว่าของไหลก่อนเข้าปะทะกับออริฟิส มีความเร็วคงที่ตลอดหน้าตัดของท่อ (หน้าตัดวงกลม) เท่ากับ V_1 เมตรต่อวินาที ของไหลที่บริเวณด้านหลังของออริฟิส จะมีลักษณะเป็นลำของไหล ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำของไหลลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ $D/2$ เมตร ณ บริเวณจุดวัดความดันที่ 2 ซึ่งถือได้

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าเป็นจุดที่มีพื้นที่หน้าตัดของการไหลน้อยที่สุด (Vena Contracta) ของ Jet ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Jet จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ 2 ไปแล้ว จุดที่ 2 หรือเรียกว่าจุด Vena Contracta ถือได้ว่าเป็นจุดที่ของไหลที่มีความเร็วเฉลี่ยสูงสุด หรือมีความดันสถิตต่ำสุด (จากสมการของ Bernulli)

สมมติฐานเบื้องต้นสำหรับการวัดอัตราการไหลด้วยออริฟิสในการทดลองนี้คือ ของไหลที่อยู่ภายในท่อไม่สามารถอัดตัวได้ ความเร็วของของไหลมีค่าคงที่ตลอดหน้าตัด (โดยไม่คิดบริเวณที่เรียกว่าบริเวณกระแสไหลวน) ของไหลไม่มีความหนืด และการไหลเกิดขึ้นแบบ Steady flow (อัตราการไหลมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลา)

สมการ Bernoulli สามารถนำมาใช้อธิบายคุณสมบัติในการไหลที่จุดต่างๆ ภายในท่อได้ ดังนั้นสมการ Bernoulli สำหรับจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของการไหลดังแสดงในรูปที่ ข-3

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

เมื่อ C_d คือ discharge coefficient

A_o คือ พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส (m^2)

P คือ ความดันสถิตของของไหล (N/m^2)

γ คือ น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight, N/m^3)

d_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรูออริฟิส

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

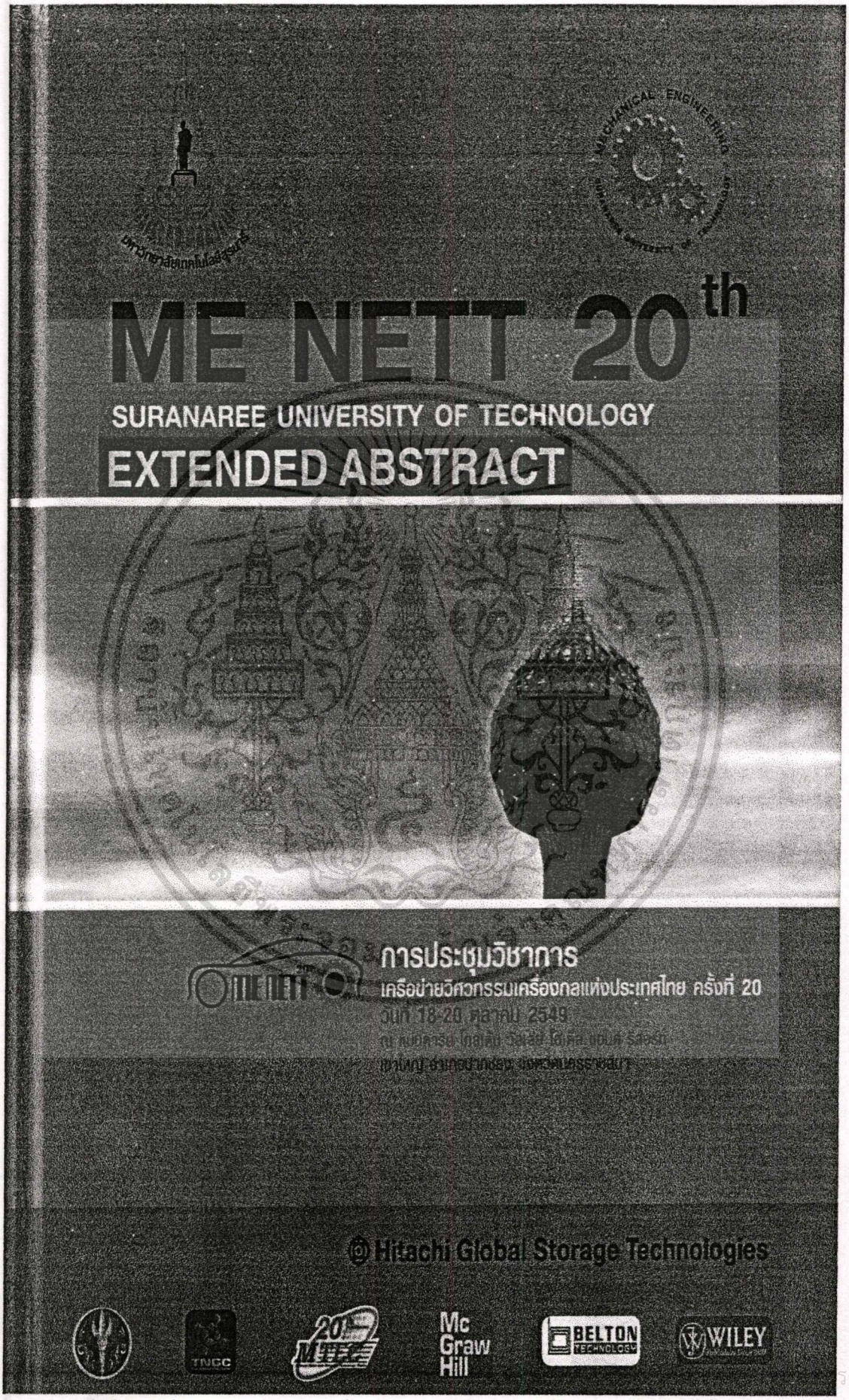
Subscript 1t คือ ค่าที่จุดที่ 1 ในทางทฤษฎี

Subscript 2t คือ ค่าที่จุดที่ 2 ในทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสาร ... รค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20
18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมด้วยครีบและตัวสร้างกระแสวน

Heat Transfer Enhancement in a Rectangular Duct with Ribs and Swirl Turbulators

ณรงค์ ทรัพย์พูศิริวงษ์ พงษ์เจต พรหมวงศ์ และ ชินรักษ์ เธียรพงษ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
โทรศัพท์ 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 อีเมล์: narong_suppoo@yahoo.com และ kppongje@kmitl.ac.th

Narong Suppoosirivong, Pongjet Promvonge and Chinaruk Thianpong
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520
Tel: 0-2326-4197 Fax: 0-2326-4198 E-mail: narong_suppoo@yahoo.com and kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมด้วยครีบและตัวสร้างกระแสวน โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวของท่อเป็นฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ในการทดลองโดยปรับใช้ความเร็วลมหลายๆ ค่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ทำการเปรียบเทียบผลของท่อที่ไม่มีครีบโดยให้ลมไหลแบบตรง ท่อที่มีครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก และท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่ผิวบนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน เพื่อพิจารณาค่าความดันลด และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จากการทดลองพบว่าการไหลหมุนวนเป็นผลให้ค่าความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างท่อที่มีครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก และท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน จะได้ว่าท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน ให้ผลการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

คำสำคัญ ครีบ ตัวสร้างกระแสวน ความดันลด สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

Abstract

This paper presents the study of heat transfer enhancement in a rectangular duct with ribs and swirl turbulators. The experiments are made by varying air velocity for turbulent flow in the test section with a constant surface heat flux. Ribs mounted on the bottom and the top surfaces of the tested duct were placed in staggered or in-line arrangements. Swirl flow in the tested duct was produced by using twisted tape inserts in circular tubes placing across the duct upstream of the test section. The experimental result shows that the use of swirl flow generated by twisted tapes and the triangular ribs mounted on the bottom and the top of the duct leads to the highest pressure drop and heat transfer rate in comparison with the duct without ribs and swirl flow.

Key words: Ribs, Swirl Turbulators, Pressure Drop, Heat Transfer Coefficient

1. บทนำ

การใช้ครีบจะมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน แบบการพาความร้อนแบบบังคับระหว่างผิวและของไหล Han, J.C., L.R. Glicksman, and W.M. Rohsenow, 1978 ทำการศึกษาผลของรูปร่างครีบ, มุม และอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูง มีผลต่อตัวประกอบเสียดทาน และการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีครีบถูกติดบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re = 3000 - 30000$ พบว่าการจัดครีบแบบสมมาตรมีผลเหมือนกับการจัดครีบแนวเยื้อง, และรูปร่างของครีบมีผลอย่างมากต่อตัวประกอบเสียดทาน และมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนไม่มากนัก จากการทดลองพบว่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเมื่อครีบมีมุม 45° Metzger, D.E., C.S. Fan, and Y. Yu, 1990 ทำการศึกษาผลของมุมครีบและตำแหน่ง มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับตำแหน่งของครีบ แบบแรกครีบถูกติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม และอีกแบบครีบถูกติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม พบว่าครีบมุม 60° ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด Han, J.C., Y.M. Zhang, and C.P. Lee, 1991 ทำการศึกษาผลของรูปร่างครีบตัววีมุม 45° และครีบตัววีมุม 60° แบบแรกแนวครีบตัววีมุม 45° และแนวครีบตัววีมุม 60° มีทิศทางเดียวกับการไหล และอีกแบบแนวครีบตัววีมุม 45° มีทิศทางเดียวกับการไหล และแนวครีบตัววีมุม 60° มีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหล ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re = 15000 - 90000$ พบว่าแนวครีบตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วีมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ในขณะที่แนวครีบตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลให้ค่าความดันลดมากที่สุด Taslim, M.E., T. Li, and D.M. Kercher, 1996 รายงานค่านัสเซิลส์นัมเบอร์ที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบเนื่องจากมุมครีบ, รูปร่างครีบตัววี และความไม่ต่อเนื่องครีบ (แนวครีบตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วย ฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่นๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อน พบว่าค่านัสเซิลส์นัมเบอร์มากที่สุดเมื่อแนวครีบตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหล Carl-Olof Olsson and Bengt Sunden, 1998 ทำการศึกษารูปแบบการไหล, ความดันลด และการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $\mathrm{Re} = 500 - 15000$ ค่า aspect ratio ของท่อสี่เหลี่ยมคือ 1-8, และครีบถูกติดกับผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม ทำการทดสอบครีบต่างๆดังนี้ ครีบถูกติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม, ครีบถูกติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม, ครีบรูปตัววีถูกติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม, ครีบรูปตัววีถูกติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม และครีบรูปตัววีแบบต่อสลับทิศทางกัน (แนวครีบรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม การถ่ายเทความร้อนและความดันลดถูกแสดงโดยตัวประกอบ j (Colburn heat transfer factor) และตัวประกอบ f (Fanning friction factor) พบว่าครีบรูปตัววีแบบต่อสลับทิศทางกันให้ค่าตัวประกอบ j และค่าตัวประกอบ f มากกว่าครีบรูปอื่นๆ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $\mathrm{Re} = 1000 - 2000$

กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหลแตกต่างกัน 2 ชนิด เป็นสิ่งที่สำคัญมากและกระบวนการดังกล่าวพบได้บ่อยๆ ในทางวิศวกรรม หม้อน้ำ คอนเดนเซอร์ อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่น้ำ หม้อน้ำรถยนต์ คอยล์ร้อน หรือคอยล์เย็น ฯลฯ ต่างเป็นตัวอย่างของกระบวนการที่ซึ่งความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น อุตสาหกรรมปิโตรเคมีสมัยใหม่ โรงงานผลิตพลังงาน ฯลฯ ต่างมีกระบวนการมากมายจนไม่สามารถนับได้ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหล 2 ชนิดโดยไม่มีการผสมกันทางกายภาพเลย โดยทั่วไปอุปกรณ์นั้นเรียกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ดังนั้นการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมด้วยครีบและตัวสร้างกระแสวนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อการค้นคว้าวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

2. ทฤษฎี

การไหลภายในท่อมีขอบเขตจำกัด โดยที่ความหนาของบาวน์ดารีเลเยอร์ไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เพราะว่าเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งบาวน์ดารีเลเยอร์ก็ก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อจึงไม่สามารถขยายออกไปได้อีก รูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ซึ่งการไหลลักษณะเช่นนี้เรียกว่าการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed flow) ส่วนการไหลก่อนหน้านี้เรียกว่าการไหลที่กำลังปรับตัว (developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Enhancement)

การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการทำให้เกิดการหมุนวนด้วยการสอดใส่แผ่นเกลียวบิด การสอดแทรกนี้ประกอบด้วยแผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 360° เป็นผลให้ความเร็วของการไหลเพิ่ม เนื่องจากความเร็วสัมผัสเพิ่มใกล้ผนังท่อ การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นผลให้เกิดความดันลด (pressure drop) มากขึ้น

ตัวพารามิเตอร์ความดันลดเกี่ยวข้องกับกำลังงานของพัดลมโดยตรง ยิ่งความดันลดมากจำเป็นต้องใช้กำลังขับเคลื่อนของไหลมาก

การจ่ายกำลังให้พัดลม, $\dot{W}_{in}$ $Watt$

$$\dot{W}_{in} = Q\Delta p \qquad (1)$$

$$\Delta p = f\frac{\rho L \bar{V}^2}{2D_h} \qquad (2)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลของของไหล, m^3/s

Δp คือ ความดันลดของของไหล, N/m^2

f คือ ตัวประกอบเสียดทาน

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

L คือ ความยาวท่อ, m

$\bar{V}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค (Hydraulic diameter), m

เงื่อนไขความร้อนที่ผิวคือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Surface Heat Flux) โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ที่ผิวครีบ

เรย์โนลด์นัมเบอร์, Re_D

$$\mathrm{Re}_D = \frac{\rho \bar{V} D_h}{\mu} \qquad (3)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h $W/m^2 \cdot K$

$$h = \frac{\dot{m} C_p \left(T_{m,o} - T_{m,i}\right)}{A_s \left(T_s - T_b\right)} \qquad (4)$$

$$T_b = \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \qquad (5)$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของของไหล, kg/s

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของของไหล, $J/kg \cdot K$

A_s คือ พื้นที่ผิว, m^2

T_s คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ย, ^oC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T_{m,i}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางเข้า, ^oC

$T_{m,o}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางออก, ^oC

T_b คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, ^oC

นัสเซิลล์นัมเบอร์, Nu_D

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k} \quad (6)$$

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (7)$$

เมื่อ k คือ ค่าการนำความร้อน, $W/m \cdot K$

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2

P คือ เส้นรอบรูปของท่อ, m

3. อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 1, 2, 3, และ 4 ซึ่งประกอบด้วย ชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำจากอะคริลิกใสขนาดหน้าตัดกว้าง 30 เซนติเมตร สูง 2.5 เซนติเมตร และมีความยาว 176 เซนติเมตร สอดใส่แผ่นบางที่ถูกบิดตามเข็มนาฬิกา เป็นคาบของมุม 360° ในท่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.1 เซนติเมตร มีความยาว 20 เซนติเมตร และมีจำนวน 11 ท่อ โดยวางในแนวทิศทางของความเร็วลมตลอดหน้าตัดครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 6 มิลลิเมตร กว้าง 2 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร

พัดลมขนาด 7.46 กิโลวัตต์ มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบขับลมผ่านท่อ โดยที่ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลม อากาศในชุดทดลองถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยแผ่นฮีตเตอร์ขนาด 500 วัตต์ จำนวน 2 แผ่น โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ซึ่งมีพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร และยาว 38 เซนติเมตร ที่ผิวครีบทั้งสอง โดยติดครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ผิวภายนอกชุดทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวนในช่วงระยะการทำความร้อนโดยแผ่นฮีตเตอร์ การวัดอุณหภูมิผิวครีบแต่ละแผ่นถูกวัดด้วยเทอร์โมคัพเปิลชนิด K จำนวน 4 ตัว และอ่านค่าจาก Data Logger ความดันลดระหว่างตำแหน่งทางเข้า 3.5 เซนติเมตร ข้างหน้าครีบและตำแหน่งทางออก 3.5 เซนติเมตร ข้างหลังครีบ อ่านค่าจากเครื่องวัดความดันลด

4. วิธีการทดลอง

พิจารณาผลของท่อที่มีครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่ผิวบนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง และเปิดเครื่องให้ความร้อน โดยให้ผิวท่อได้รับความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ปรับความเร็วลมในชุดทดลองให้ได้เท่ากับ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ สอดใส่แผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 360° ในท่อกลมจำนวน 11 ท่อ และใส่ลงในชุดทดลอง เพื่อให้ลมเกิดการหมุนวน ทำการติดครีบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง ตามลำดับ บันทึกผลของความดันลด อุณหภูมิผิวครีบ อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบ และอุณหภูมิที่ทางออกครีบ

พิจารณาผลของท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่ผิวบนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง และเปิดเครื่องให้ความร้อน โดยให้ผิวท่อได้รับความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ปรับความเร็วลมในชุดทดลองให้ได้เท่ากับ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ สอดใส่แผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 360° ในท่อกลมจำนวน 11 ท่อ และใส่ลงในชุดทดลอง เพื่อให้ลมเกิดการหมุนวน ทำการติดครีบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง ตามลำดับ โดยให้พื้นผิวครีบด้านตรงกันข้ามมุมฉากสัมผัสกับทิศทางการไหลของลม บันทึกผลของความดันลด อุณหภูมิผิวครีบ อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบ และอุณหภูมิที่ทางออกครีบ

5. ผลการทดลอง

พิจารณาผลของท่อที่มีครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ผิวบนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

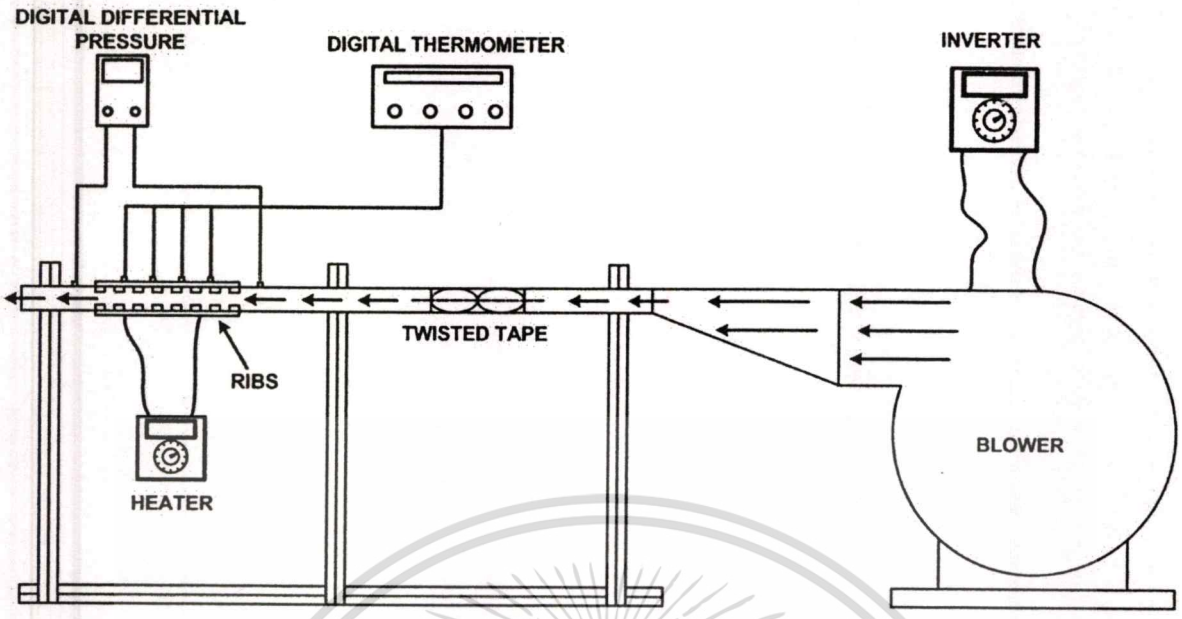
ในรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์นัมเบอร์กับความดันลด ที่ความเร็วลม 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดยใช้แผ่นบิดมุม 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้น ความดันลดจะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อไม่มีครีบ, เพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบแนวเยื้องและเพิ่มมากขึ้นเมื่อท่อมีครีบแนวเดียวกัน

ในรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์นัมเบอร์กับนัสเซิลล์นัมเบอร์ ที่ความเร็วลม 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดยใช้แผ่นบิดมุม 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้นัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น นัสเซิลล์นัมเบอร์จะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อไม่มีครีบ และเพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยท่อที่มีครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์ใกล้เคียงกัน

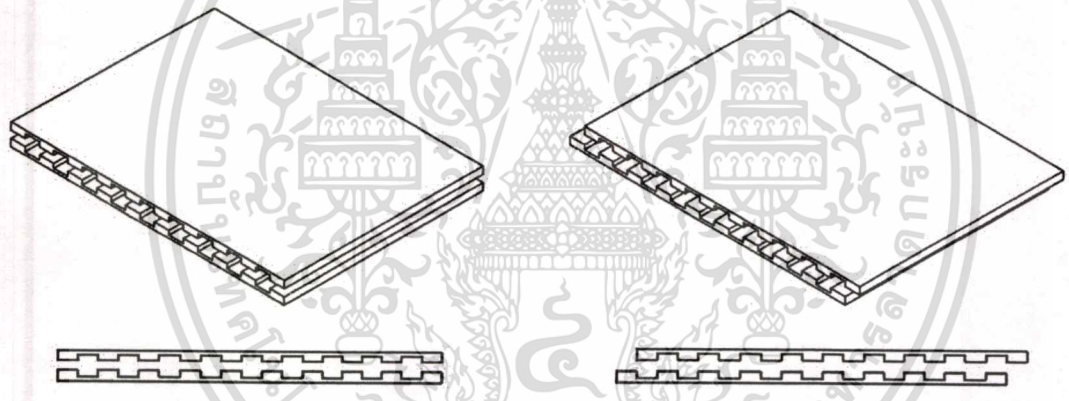
พิจารณาผลของท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่ผิวบนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

ในรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์นัมเบอร์กับความดันลด ที่ความเร็วลม 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดย

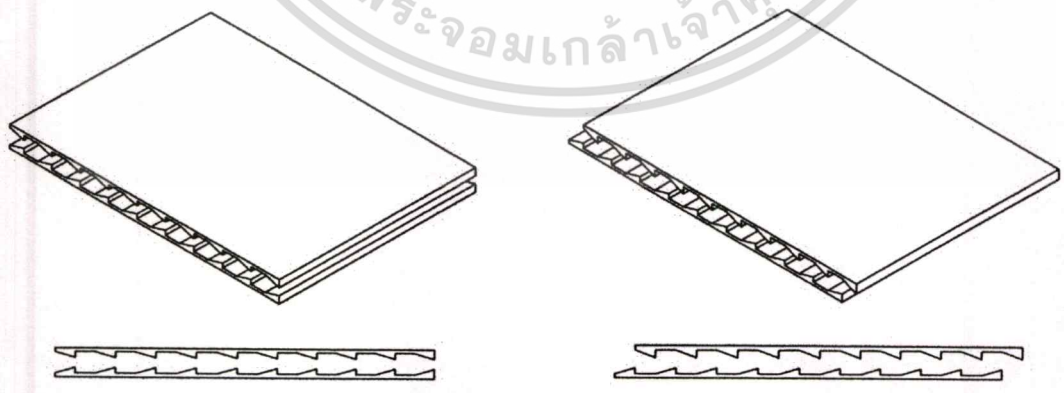
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1. แสดงอุปกรณ์การทดลอง

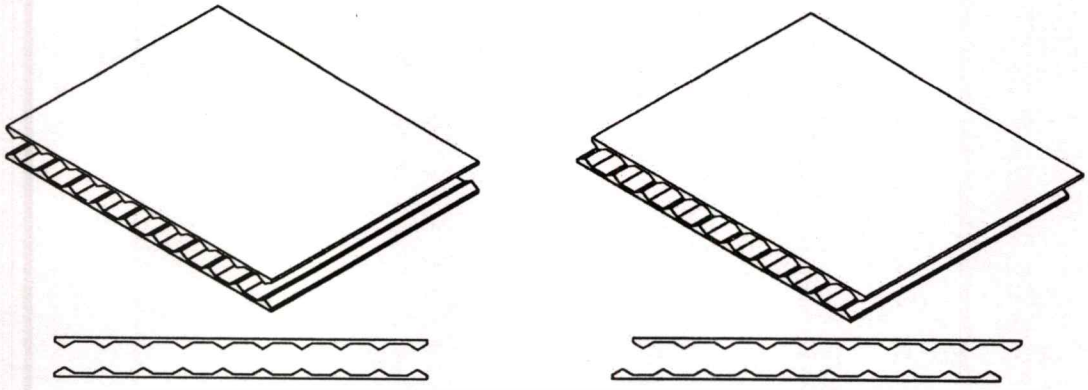


รูปที่ 2. แสดงครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง



รูปที่ 3. แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4. แสดงครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง

ใช้แผ่นบิดมุม 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้น ความดันลดจะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อไม่มีครีบ, เพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบแนวเยื้องและเพิ่มมากขึ้นเมื่อท่อมีครีบแนวเดียวกัน

ในรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์นัมเบอร์กับนัสเซิลล์นัมเบอร์ ที่ความเร็วลม 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดยใช้แผ่นบิดมุม 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้นัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น นัสเซิลล์นัมเบอร์จะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อไม่มีครีบ และเพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยท่อที่มีครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์ใกล้เคียงกัน

พิจารณาผลของท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่ผิวบนและผิวล่างท่อ แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

ในรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์นัมเบอร์กับความดันลด ที่ความเร็วลม 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดยใช้แผ่นบิดมุม 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้น ความดันลดจะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อไม่มีครีบ, เพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบแนวเยื้องและเพิ่มมากขึ้นเมื่อท่อมีครีบแนวเดียวกัน

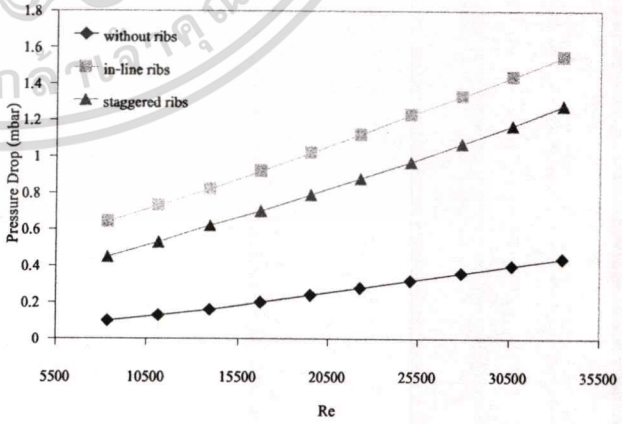
ในรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์นัมเบอร์กับนัสเซิลล์นัมเบอร์ ที่ความเร็วลม 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, และ 12 เมตรต่อวินาที ของท่อที่ไม่มีครีบโดยให้ลมไหลแบบตรง, ท่อที่มีครีบที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวนโดยใช้แผ่นบิดมุม 360° ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าเรโนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้นัสเซิลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น นัสเซิลล์นัมเบอร์จะมีค่าขึ้นอยู่กับเรโนลด์นัมเบอร์, สภาวะการหมุนวนของลม และการติดตั้งครีบ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับท่อไม่มีครีบ และเพิ่มขึ้นเมื่อท่อมีครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้อง โดยท่อที่มีครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องให้ค่านัสเซิลล์นัมเบอร์ใกล้เคียงกัน

ค่าพลังงานไฟฟ้าขับพัดลม

ท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว แบบมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน ใช้พลังงานไฟฟ้าขับพัดลมมากขึ้น 2.58 W โดยเปรียบเทียบกับท่อที่ไม่มีครีบโดยให้ลมไหลแบบตรง ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re = 33434$

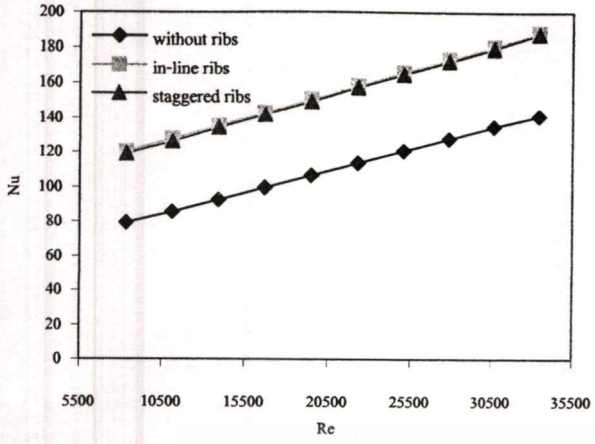
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว แบบมีแนวเยื้อง โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ 45.49 % โดยเปรียบเทียบกับท่อที่ไม่มีครีบโดยให้ลมไหลแบบตรง ที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re = 33434$

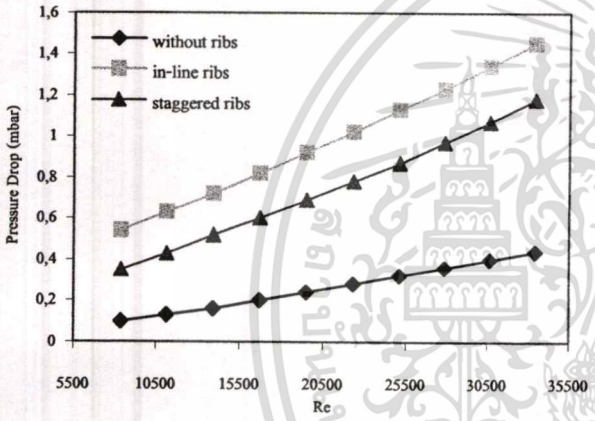


รูปที่ 5. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ กรณีครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

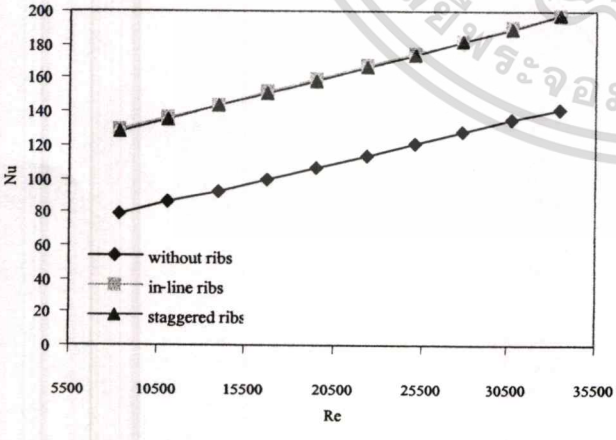
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



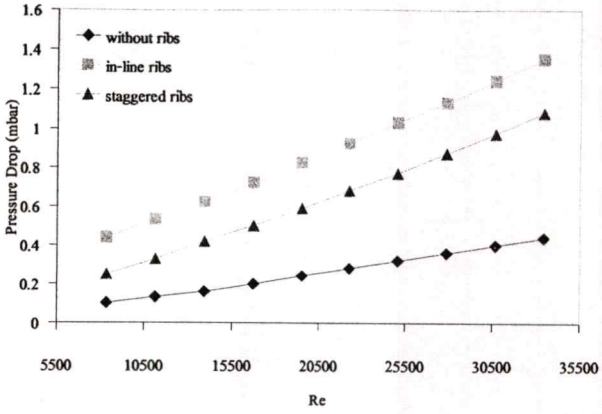
รูปที่ 6. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ กรณีครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน



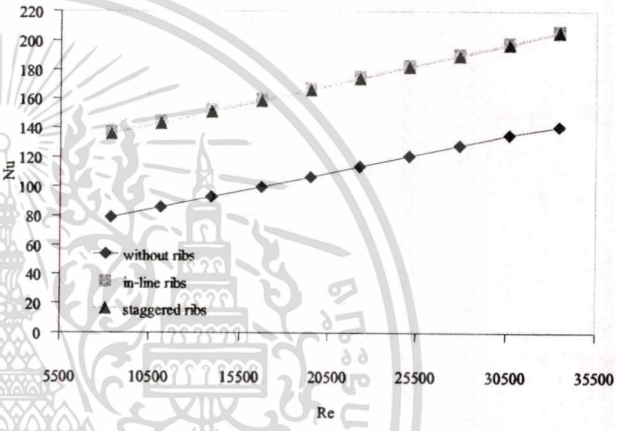
รูปที่ 7. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ กรณีครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน



รูปที่ 8. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ กรณีครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน



รูปที่ 9. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ กรณีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน



รูปที่ 10. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลล์นัมเบอร์กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ กรณีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าชุดทดลองที่มีครีบและลมไหลแบบหมุนวนช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว โดยให้ลมไหลแบบหมุนวน ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ท่อที่มีครีบแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเยื้องให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน การติดครีบแบบมีแนวเยื้องให้ค่าความดันลดน้อยกว่าการติดครีบแบบมีแนวเดียวกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] พงษ์เจต พรหมวงศ์ "การถ่ายเทความร้อน" ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2542 หน้า 225-252.

[2] J.C. Han, L.R. Glicksman, W.M. Rohsenow, An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces, Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 21, 1978, pp. 1143-1156.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[3] D.E. Metzger, C.S. Fan, Y. Yu, Effects of Rib Angle and Orientation on Local Heat Transfer in Square Channels With Angled Roughness Ribs, in: R.K. Shah, A.D. Kraus, D.E. Metzger, Compact Heat Exchangers, Hemisphere, Washington, 1990.

[4] J.C. Han, Y.M. Zhang, C.P. Lee, Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs, ASME J. Heat Transfer Vol. 113, 1991, pp. 590-596.

[5] M.E. Taslim, T. Li, D.M. Kercher, Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped, and discrete ribs on two opposite walls, ASME J. Turbomachinery Vol. 118, 1996, pp. 20-28.

[6] Carl-Olof Olsson and Bengt Sunden, Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels, Experimental Thermal and Fluid Science 16 1998, pp. 349-365.

[7] Fox, Robert W., and Alan T. McDonald: Introduction to Fluid Mechanics, Wiley, New York, 1998, pp. 332-395.

[8] Incropera, Frank P., and David P. Dewitt: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, New York, 1996, pp. 419-461.

[9] Holman, J.P. : Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1990, pp. 217-321.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายณรงค์ ทรัพย์พูศิริวงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 31 มกราคม 2521 ที่จังหวัดนราธิวาส สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้