

การเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อโดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด

THERMAL PERFORMANCE AUGMENTATION IN DUCT WITH
FLAPPED RECTANGULAR WINGLETS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อโดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด

THERMAL PERFORMANCE AUGMENTATION IN DUCT WITH
FLAPPED RECTANGULAR WINGLETS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

THERMAL PERFORMANCE AUGMENTATION IN DUCT WITH
FLAPPED RECTANGULAR WINGLETS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อโดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด

Thermal Performance Augmentation in Duct with Flapped Rectangular Winglets

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|----------------|---------------|--------------|----------|
| 1.นางสาวฐิติญา | คล้ายขยาย | รหัสประจำตัว | 60010263 |
| 2.นายนภดล | เผือกแสงทิพย์ | รหัสประจำตัว | 60010498 |
| 3.นายบุญรักษ์ | มโนยศ | รหัสประจำตัว | 60010623 |



อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

(รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อกลมโดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด

นางสาวฐิติญา	คล้ายขยาย	60010263
นายณภดล	เผือกแสงทิพย์	60010498
นายปุ่นยรักษ์	มโนยศ	60010623
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2563		

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอวิธีการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนโดยศึกษาพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม จึงนำแนวคิดจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์โดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดทำให้เกิดกระแสหมุนควงตามแนวยาว โดยพิจารณารูปทรง, มุมปะทะ รวมถึงอัตราส่วนการขวางกั้นการไหล ซึ่งส่งผลต่อการสูญเสียความดันและแรงเสียดทานภายในท่อ เพื่อควบคุมกลไกการไหลของของไหล การทดลองที่สภาวะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อคงที่ ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ท่อเป็นหน้าตัดกลมและมีช่วงของการทดสอบยาว 1200 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยใช้เลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ช่วง 4,760 ถึง 21,092 ทำการทดสอบความถูกต้องของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมโดยใช้เลขนัสเซลท์และค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากการทดลองนำมาเทียบกับทางทฤษฎี นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการประเมินค่าสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นกั้น จากผลการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าอัตราส่วนการขวางกั้นการไหลเท่ากับ 0.25 และมุมปะทะที่ทำให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 45 องศา 30 60 90 องศาตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Thermal performance augmentation in Duct with Flapped Rectangular Winglets

Thitiya Klaykayai 60010263
Napadol Peoksangthip 60010498
Punyaruk Manoyot 60010623
Assoc.Prof.Dr.Pongjet Promvongse Advisor
Year 2020

ABSTRACT

This research presents a way to increase the heat transfer performance by studying the thermal behaviors of turbulent air flow in a round duct. Consequently, the concepts from various related researches were applied by using the stacked Flapped Rectangular winglets to create a longitudinal vortex flow throughout. By considering the shape, attack angle, Height and pitching distance of the winglets Including the blocking ratio, which affects the pressure loss and friction within the pipeline to regulate the fluid flow mechanism. Experiment at a constant tube surface heat flux condition is conducted using air as the test fluid. The test duct having a round cross-section has a test length of 1200 mm with varying the air flow rate for Reynolds numbers from the range of 4,760 to 21,092. The validity test of a round tube heat exchanger was performed using the Nusselt number and the friction factor obtained from the experiments with theoretical comparison. A performance evaluation of the tube heat exchanger with the winglets installed is also presented. From the preliminary results, it was found that the blocking ratio equal to 0.25 and attack angle of the winglets to obtain the highest thermal performance factor are equal to 45 degree 30 60 and 90 degree respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์การเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อโดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการเป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาการเอาใจใส่การให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณพี่ๆปริญญโทและปริญญเอกในห้องปฏิบัติการซึ่งคอยให้คำแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหาและคำปรึกษาในทุก ๆ ด้าน

ขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์เพื่อใช้ในการศึกษา

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณเพื่อนในกลุ่มและครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมาจนทำให้ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี รวมถึงขอขอบพระคุณผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ที่เป็นส่วนหนึ่งของความสำเร็จทั้งหมด

นางสาวฐิติญา คล้ายขยาย
นายณภดล เผือกแสงทิพย์
นายปุณยรักษ์ มโนยศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	X

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 โครงร่างวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	5
2.1 บทนำ	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย	14
บทที่ 3 สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	15
3.1 บทนำ	15
3.2 กลศาสตร์ของไหล	15
3.2.1 สภาวะของไหล	16
3.2.2 ความเร็วเฉลี่ย	17
3.2.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว	18
3.2.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3.3 การถ่ายเทความร้อนงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้ว	23
3.4 การสมดุลของพลังงาน	24
3.5 สหพันธ์การพาความร้อนการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม	26
3.6 สหพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม	27
3.7 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน	28
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์และวิธีการทดลอง	29
4.1 บทนำ	29
4.2 การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลอง	29
4.2.1 พัดลม	29
4.2.2 ท่อทางเข้าชุดทดลอง	30
4.3 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง	31
4.3.1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	31
4.3.2 แหล่งจ่ายอากาศ	32
4.3.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ	34
4.3.4 ถังพักลม	35
4.3.5 อุปกรณ์ควบคุมฟลักซ์ความร้อนของแผ่นฮีตเตอร์	35
4.3.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	36
4.3.7 เครื่องวัดความดันตกคร่อม	37
4.3.8 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ	38
4.4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง	38
4.4.1 อุปกรณ์ชุดทดลอง	38
4.4.2 อุปกรณ์ติดตั้งในชุดทดลอง	40
4.5 วิธีการทดลอง	41
4.6 การวิเคราะห์ข้อมูล	42
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	45
5.1 บทนำ	45
5.2 ผลการทดสอบท่อผนังเรียบ	46
5.2.1 เลขนัสเซิลท์	46
5.5.2 ตัวประกอบเสียดทาน	47
5.3 ผลการทดลองท่อติดตั้งปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.3.1 อิทธิพลของมุมปะทะของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงาน แบบคว่ำ	48
5.3.2 สมรรถนะความร้อนของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงาน แบบคว่ำ	49
5.3.3 อิทธิพลของมุมปะทะของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงาน แบบหงาย	51
5.3.4 สมรรถนะความร้อนของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงาน แบบหงาย	53
5.4 สรุป	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัยเชิงลต์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และ

ตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน กรณีสำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด

56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

vii

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพตัดส่วนของท่อที่ใช้ทดสอบ	8
รูปที่ 2.2 ประเภทของปีก (winglet)	9
รูปที่ 2.3 ส่วนทดสอบที่ติดตั้งปีกแบบเคลด้าที่มีรูพรุนที่วางซ้ำ ๆ กันบนเทพพรุณแบบไขว้	9
รูปที่ 2.4 ประเภทของปีกที่ทำการทดลอง	10
รูปที่ 2.5 แบบจำลองเค้าโครงท่อรูปไข่	10
รูปที่ 2.6 ลักษณะของท่อเจาะรูที่สอดเข้าไปในท่อ	11
รูปที่ 2.7 ประเภทของปีกแบบไม่มีรูเจาะวงกลม	12
รูปที่ 2.8 ประเภทของปีกแบบมีรูเจาะวงกลม	13
รูปที่ 2.9 เรขาคณิตของโดเมนการคำนวณ	13
รูปที่ 3.1 การก่อตัวของชั้นขอบเขตการไหลของการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม	16
รูปที่ 3.2 สมดุลแรงบนอีลิเมนต์ดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ก่อตัวเต็มที่ในท่อกลม	18
รูปที่ 3.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม	21
รูปที่ 3.4 การก่อตัวของชั้นของเขตทางความร้อนในท่อกลมสำหรับการไหลแบบราบเรียบระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัว	22
รูปที่ 3.5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ	24
รูปที่ 4.1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	32
รูปที่ 4.2 พัฒนแบบหอยโข่งแรงดันสูง	32
รูปที่ 4.3 มอเตอร์	33
รูปที่ 4.4 อินเวอร์เตอร์	33
รูปที่ 4.5 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบออริฟิส	34
รูปที่ 4.6 เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง	34
รูปที่ 4.7 ถังพักลม	35
รูปที่ 4.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ	35
รูปที่ 4.9 เครื่องเก็บข้อมูล	36
รูปที่ 4.10 คอมพิวเตอร์ รุ่น Toshiba Satellite M50	36
รูปที่ 4.11 เทอร์โมคัปเปิล	37
รูปที่ 4.12 เครื่องวัดความดันตกคร่อม, Dwyer 475 Mark III Digital Manometer	37
รูปที่ 4.13 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (vane-type anemometer), TESTO 445	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ผู้วางเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

	หน้า
รูปที่ 4.14 แผนผังของชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	39
รูปที่ 4.15 อุปกรณ์ติดตั้งในชุดทดลอง	40
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สำหรับท่อผนังเรียบ	47
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ	48
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานสำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ	49
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ	49
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ	50
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ	50
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สำหรับสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบหงาย	52
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานสำหรับสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบหงาย	52
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สำหรับสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบหงาย	53
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สำหรับสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบหงาย	54
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ของสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบหงาย	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	พื้นที่การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด, m^2
A_c	พื้นที่หน้าตัด, m^2
A_s	พื้นที่ผิวท่อ, m^2
C_f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
c_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะภายใต้กรณีความดันคงที่, $J/kg \cdot K$
c_v	ค่าความจุความร้อนจำเพาะภายใต้กรณีปริมาตรคงที่, $J/kg \cdot K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, m
f	ตัวประกอบเสียดทาน
f_0	ตัวประกอบเสียดทานของท่อผนังเรียบ
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
L	ความยาวท่อ, m
\dot{m}	อัตราการไหลของของไหล, kg/s
Nu	เลขนัสเซิลท์
Nu_0	เลขนัสเซิลท์ของท่อผนังเรียบ
Pr	เลขพลานท์
PR	อัตราส่วนระยะพิตซ์ต่อขนาดท่อ (P/D)
p	ระยะพิตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Q อัตราการถ่ายเทความร้อน, W

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

x

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

q_{conv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด, W
q_s''	ฟลักซ์ความร้อนที่ผิว, W/m^2
R	ค่าคงที่ของก๊าซ, $J/kg \cdot K$
Re_D	เลขเรย์โนลด์
r	รัศมีท่อกลม, m
T	อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใด ๆ, C°
T_b	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, C°
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ, C°
$T_{m,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อทางเข้า, C°
$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อทางออก, C°
T_s	อุณหภูมิที่ผิว, C°
TEF	สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน
t	เวลา, s
u_m	ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ, m/s
\bar{V}	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s
x	ความยาวตามแนวแกน, m
ρ	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
μ	ความหนืดของของไหล, $kg/(m \cdot s)$
μ_s	ความหนืดของของไหลที่ผิว, $kg/(m \cdot s)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

μ	ความหนืดของของไหล, $kg/(m \cdot s)$
μ_s	ความหนืดของของไหลที่ผิว, $kg/(m \cdot s)$
ν	ปริมาตรจำเพาะ, m^3/kg
τ_r	ความเค้นเฉือนตามแนวรัศมี, N/m^2
τ_s	ความเค้นเฉือนบนผิว, N/m^2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาศักยภาพทั้งในด้านเทคโนโลยีการผลิต วัสดุหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นไปอย่างรวดเร็ว หลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชนทั่วโลกได้ตระหนักถึงความสำคัญในการประหยัดและใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามความต้องการในการใช้พลังงานยังมีมากขึ้นตามกาลเวลา อันเนื่องมาจากการแข่งขันทางธุรกิจ การเพิ่มจำนวนของโรงงานอุตสาหกรรม และจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มลพิษ ภาวะโลกร้อน วิกฤตราคาเชื้อเพลิง และวิกฤตเศรษฐกิจ เป็นต้น ฉะนั้นหากขาดการใช้องค์ความรู้พื้นฐานที่เหมาะสมและขาดการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกสบายที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ปัญหาต่าง ๆ ก็ยิ่งทวีความรุนแรงและยากที่จะเยียวยาได้

การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในปัจจุบันเป็นสิ่งสำคัญในอุตสาหกรรม ในโรงงานหลาย ๆ ขนาด ในทางอุตสาหกรรมมีการนำเอาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหลาย ๆ ประเภทมาประยุกต์ใช้ในระบบหลากหลายมากมาย ทั้งมีการแข่งขันกันในด้านยอดขาย กำไร และพัฒนาสินค้าหรือผลิตภัณฑ์มากขึ้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงต้องมีประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย เทคโนโลยีที่ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจึงสำคัญมากต่อการออกแบบและประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น หม้อน้ำ เครื่องกลั่น เครื่องควบแน่น เครื่องปรับอากาศ ท่อระบายความร้อน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กาน้ำร้อน เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม เป็นต้น การออกแบบอุปกรณ์หรือระบบการถ่ายเทหรือแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพ ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่ต้องการของงานที่จะนำไปใช้ อีกทั้งต้องสามารถทำงานได้ดีตามความต้องการ ราคาถูก สมรรถนะในการถ่ายเทและแลกเปลี่ยนความร้อนสูง การเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูง โครงสร้างไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด อายุการใช้งานที่นาน ปัญหาการบำรุงรักษา ค่าบำรุงรักษาซ่อมแซมถูก ที่สำคัญต้องมีความน่าเชื่อถือและปลอดภัยสูง เพื่อให้บรรลุคุณลักษณะที่ต้องการเหล่านี้ สิ่งที่สำคัญคือการพัฒนาความสามารถและศักยภาพของระบบถ่ายเทความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อลดการใช้พลังงานและต้นทุนมีขนาดที่เหมาะสมเคลื่อนย้ายง่าย ทำให้ลดการใช้วัสดุที่ไม่จำเป็นและพื้นที่ติดตั้งใช้งานซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่ยั่งยืน เพราะทำให้มีการใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิงและวัสดุอย่างคุ้มค่าที่สุด รวมทั้งลดภาวะโลกร้อนหรือภาวะเรือนกระจกได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ซื้อเพลิงและวัสดุอย่างคุ้มค่าที่สุด รวมทั้งลดภาวะโลกร้อนหรือภาวะเรือนกระจกได้อีกด้วย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ 1 เป็น Active Techniques ซึ่งเป็นการใช้แหล่งพลังงานภายนอกเข้ามาช่วยในการทำงาน เช่น อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้า โดยมีผลทำให้เกิดการสั่นของพื้นผิว ทำให้ของไหลเกิดการสั่นสะเทือนและเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น และ กลุ่มที่ 2 เป็นแบบ Passive Techniques โดยกลุ่มนี้จะไม่มีการใช้พลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่จะเป็นการใช้วิธีการออกแบบลักษณะพื้นผิวของท่อแบบพิเศษซึ่งแตกต่างไปจากผิวเรียบ อีกทั้งยังปรับปรุงของไหลหรือสารทำงานให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดีมากขึ้น

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่นิยมกัน ณ ขณะนี้ ส่วนมากเรียกว่า Passive Method เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบวิธีที่ได้ผลดีมากที่สุดอย่างหนึ่งคือการติดครีบบางขวางการไหลของของไหลบนผนังท่อภายใน ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ถึงแม้การเพิ่มพื้นที่ผิวในท่อจะสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ แต่ก็มีผลเสียคือทำให้ความเสียดทานภายในท่อมียค่าสูงขึ้นจึงทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในท่อเช่นกัน

แนวคิดหรือหลักการในการนำเอาครีบบางและตัวสร้างการหมุนควงของของไหลตามแนวยาวมาติดตั้งในท่อ สิ่งจำเป็นที่จะต้องพิจารณาคือรูปร่าง, ขนาด, มุมและระยะพิตช์ของแผ่นครีบบาง ส่งผลต่อลักษณะการไหล การสูญเสียความดันและแรงเสียดทาน เพื่อปรับปรุงลักษณะการไหลในท่อ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าทดลองในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในช่องที่มีครีบบางด้วยตัวสร้างการหมุนควงของของไหลตามแนวยาว เนื่องจากท่อเป็นโครงสร้างที่สำคัญในระบบหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั่ว ๆ ไป จึงต้องหาค่าของพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่เหมาะสมซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนเพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ อีกทั้งเป็นแนวทางในการศึกษาหรือตัดสินใจเลือกใช้และออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมคุ้มค่ามากที่สุดเพื่อให้ใช้งานง่ายและให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อกลมโดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด ซึ่งใช้อากาศเป็นของไหลในการทดสอบวัตถุประสงค์ของการศึกษามีดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อกลมโดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2.2 เพื่อศึกษาวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน เช่น มุมปะทะ การไหล (α), อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (P/D), อัตราส่วนความสูงของปีก ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (e/D) เป็นต้น

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมโดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิด ปิดกับท่อกลมผนังเรียบ

1.2.4 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมโดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ทำการศึกษาทดลองเพื่อคำนวณหาค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) เลขนัสเซิลท์ (Nu) ตัว ประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (TEF) และความดันตกคร่อม (ΔP)

1.3.2 ของไหลที่ใช้ในการทดสอบคืออากาศ

1.3.3 ความเร็วอากาศอยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ (Re) ระหว่าง 4170 ถึง 21,092

1.3.4 การให้ความร้อนที่พื้นผิวท่อเป็นแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ (constant heat flux)

1.3.5 ปีกที่ทดสอบทำจากแผ่นอลูมิเนียมหนาที่มีความสูง (e) มีลักษณะวางเอียงทำมุม (α)

1.3.6 หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเพิ่มสมรรถนะความร้อนภายในท่อ อาทิเช่น รูปทรง การจัดวาง มุมปะทะการไหล ความสูง ระยะพิชต์ ความดันตกคร่อมและการถ่ายเทความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ภายในท่อกลมโดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด

1.4.2 สามารถพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น

1.4.3 เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรมและ ภาคเกษตรกรรม

1.4.4 ลดต้นทุนในการผลิตและได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.5 โครงร่างวิทยานิพนธ์

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและทฤษฎีกลศาสตร์การไหล

1.5.2 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมกรไหล ความสูงของปีกและตำแหน่งของการติดตั้ง

1.5.3 ออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดเหมาะสมคือมุมปะทะการไหล, อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (P/D), อัตราส่วนความสูงของปีกต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (e/D) เป็นต้น

1.5.4 การทดลองเพื่อเก็บค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) และค่าการสูญเสียโดยแสดงในเทอมของตัวประกอบความเสียดทาน (friction loss)

1.5.5 บันทึกและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.5.6 สรุปผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงความเป็นมางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่มีครีบบเป็นตัวสร้างกระแสน้ำวน ซึ่งทำให้ทราบถึงการศึกษาศาสตร์และเทคนิคที่นำไปประยุกต์ใช้กับเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ผ่านมา เพื่อนำไปหาแนวทางพัฒนาปรับปรุง การเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่สูงมากขึ้นของงานวิจัยต่อไป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลากหลายประเภทมากทั้งในกระบวนการผลิตสินค้าให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงมีนักวิจัยจำนวนมากทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศให้ความสนใจเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อช่วยเพิ่มกำไรและคุณภาพของสินค้า อีกทั้งยังลดขนาดและต้นทุนการผลิตให้น้อยลงไปกว่าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างทิศทางของไหลที่แตกต่างกัน 2 ชนิด เป็นสิ่งจำเป็นมากและสามารถพบได้บ่อย ๆ ในทางวิศวกรรมหม้อน้ำรถยนต์คอนเดนเซอร์(Condenser) ในอุปกรณ์ให้ความร้อน แก่นหม้อน้ำ คอยล์ร้อนหรือคอยล์เย็น ฯลฯ ที่กล่าวมาเป็นตัวอย่างของกระบวนการที่ความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น โรงงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่ เช่น โรงงานผลิตพลังงาน ฯลฯ ต่างมีกระบวนการมากมายที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างทิศทางของไหล 2 ชนิด โดยท่อทั้งสองจะไม่มีการไหลมาผสมกันแต่จะแลกเปลี่ยนความร้อนกันเพียงอย่างเดียว อุปกรณ์นั้น เรียกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนธรรมดาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด โดยขึ้นอยู่กับการจัดวางทิศทางสัมผัสของทิศทางการไหลของของไหลทั้ง 2 ชนิด ชนิดแรกทิศทางทั้งสองไหลตัดซึ่งกันและกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ เรียกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกันหรือตั้งฉากกัน(Cross-flow heat exchanger) ตัวอย่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ได้แก่ หม้อน้ำรถยนต์ หรือหน่วยหล่อเย็นในท่อระบบปรับอากาศ อีกประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยเครื่องที่มีทิศทางการไหลของของไหล 2 ชนิดเคลื่อนที่ในทิศทางขนานกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นแบบเปลือกและท่อ(shell-and-tube) เป็นประเภทที่พบมากที่สุดและแพร่หลายเป็นอย่างมาก ยกตัวอย่าง เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกัน หรือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น เป็นต้น

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ จึงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานมากและต้นทุนสูง ดังนั้นการหาวิธีหรือแนวทางในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยลดต้นทุนด้านการเงิน หรือด้านพลังงานในกระบวนการผลิตจึงเป็นวิธีการที่ดีในการเพิ่มกำไรและยังเป็นการลดภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

Moradi et al. [1] ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมในกระบวนการกลั่นน้ำมันซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การไหลของของเหลวและการถ่ายเทความร้อนของน้ำภายใน วิธีเพิ่มประสิทธิภาพเปลือกแผ่นกั้นและท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำการออกแบบและทดลองแผ่นกั้นหรือโครงแบบท่อตามยาวในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อรบกวนการไหลแบบปั่นป่วนของของไหลภายในท่อ จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของทุกชุดการทดลองมีประสิทธิภาพดีกว่าแผ่นกั้นทั่วไปมากที่สุด 42.8 % เมื่อเทียบกับที่อัตราการไหลเดียวกัน

Promvong et al. [2] ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเทอร์โมไฮดรอลิกในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งปีกสี่เหลี่ยมรูปตัว V และ ปีกเดลต้ารูปตัว V ที่ทำมุม 45° โดยอัตราส่วนการขวางกั้น (BR) และความสัมพัทธ์ระยะพิทช์ของปีก (PR) ต่าง ๆ ในขอบเขตเลขเรย์โนลด์ (Re) ช่วง 4130–25,900 จากการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนระหว่างปีกสี่เหลี่ยมรูปตัว V และ ปีกเดลต้ารูปตัว V พบว่าปีกสี่เหลี่ยมรูปตัว V มีอัตราการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียแรงเสียดทานที่สูงกว่าปีกเดลต้ารูปตัว V ปีกสี่เหลี่ยมรูปตัว V ที่มีอัตราส่วนการขวางกั้น (BR) ดีกว่าและความสัมพัทธ์ระยะพิทช์ของปีก (PR) ที่น้อยกว่า ให้เลขนัสเซิลท์ (Nu) มากกว่าที่อัตราคราด 384–409 % ปัจจัยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) สูงสุดประมาณ 2.0 สำหรับปีกเดลต้ารูปตัว V ที่ PR = 1.0 และ BR = 0.15 สูงกว่าปีกสี่เหลี่ยมรูปตัว V ประมาณ 3 % ปีกเดลต้ารูปตัว V จึงถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพเทอร์โมไฮดรอลิกในระบบระบายความร้อน

LingLui et al. [3] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมกรไหลของท่อกลมซึ่งติดตั้งกับเครื่องกำเนิดกระแสน้ำวนแบบปีกสี่เหลี่ยม (RWVGs) ในเชิงตัวเลขและการทดลองที่มีขอบเขตเงื่อนไขของฟลักซ์ความร้อนสม่ำเสมอจากการศึกษาพบว่าเครื่องกำเนิดกระแสน้ำวนแบบปีกสี่เหลี่ยม (RWVGs) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมกันระหว่างของเหลวร้อนบริเวณผนังท่อของเหลวเย็นบริเวณแกนกลาง ยิ่งมุมเอียงมากส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงยิ่งสูง เลขนัสเซิลท์ (Nu) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น 1.16–2.49 เท่า และ 2.09–12.32 เท่า เมื่อเทียบกับที่อัตราคราดและเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มมุมเอียง (β) หรืออัตราส่วนความสูงของปีกแบบไร้มิติ (H_2/D) อีกทั้งประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยรวมที่ดีที่สุด (PEC) มีค่า 1.18 ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ $\beta = 30^\circ$, $H_2/D = 0.5$ และเลขเรย์โนลด์ (Re) = 5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
ไม่ว่ากรณีใดโดยไม่แจ้งชื่อผู้วิจัยให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Zheng et al. [4] การทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนเฟสเดียวโดยอาศัยกระแสความร้อนไหลแนวยาวในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ผู้วิจัยต้องการเพิ่มประสิทธิภาพจากการตรวจสอบทฤษฎีด้วยหลักการที่แตกต่างกัน โดยต้องการอนุรักษ์พลังงานสิ่งแวดล้อม ดังนั้นผู้วิจัยจึงโฟกัสความสมดุลระหว่างการเสริมการถ่ายเทความร้อนและการลดความต้านทานการไหล จากการทดลองพบว่า ช่องการไหลที่เหมาะสมส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นกระแสน้ำวนไหลตามแนวยาว ซึ่งมีความสามารถในการถ่ายโอนของเหลวจากบริเวณการไหลของแกนกลางไปยังผนังท่อและเคลื่อนย้ายของไหลกลับไปพร้อม ๆ กัน และทำให้ความดันลดลงของสนามการไหลรวมถึงแก้ปัญหาเรื่องอุณหภูมิที่มากเกินไป ลดการสร้างเอนโทรปี ซึ่งท่อที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง เช่น ท่อ DDIR, ท่อ AEA, ท่อแถบกรวย

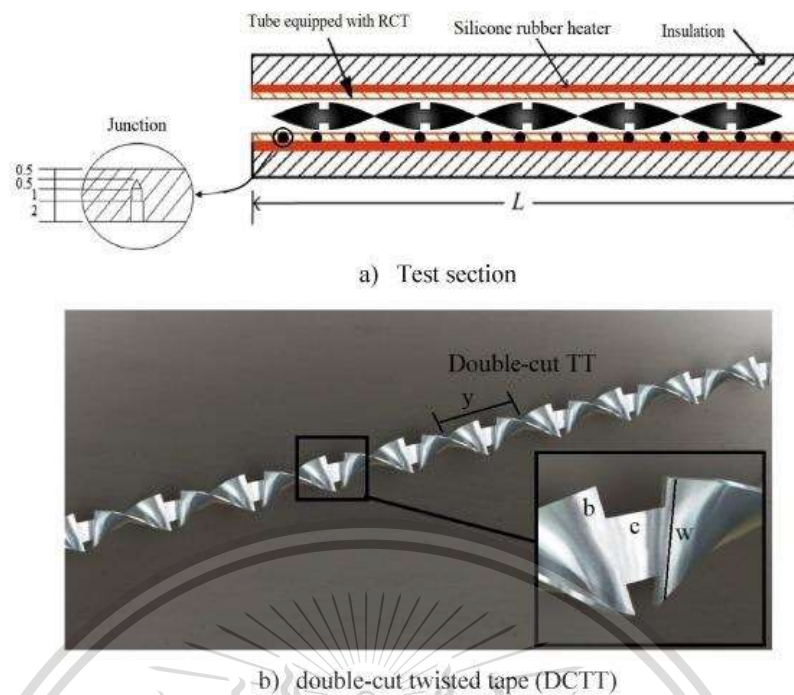
Zheng et al. [5] ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพความร้อนของไฮดรอลิกที่ของไหลปั่นป่วนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบวงกลม โดยมีเครื่องกำเนิดกระแสความร้อนเป็นปฏิกิริยาเปลี่ยนผิวด้านหลายตัว ซึ่งปีกสี่เหลี่ยม ($N = 4, 6, 8$), อัตราส่วนความสูง ($HR = 0.05, 0.1, 0.2$) และอัตราส่วนพิทช์ ($PR = 1.57, 3.14, 4.71$) ถูกหาจากการทดลอง กำหนดอัตราส่วนเลขนี้สเกลที่อยู่ในช่วง 1.46–11.63 และ 1.15–2.32 จากการทดลองกระแสน้ำเหล่านี้ส่งผลให้ประสิทธิภาพความปั่นป่วนของของไหลดีขึ้นและกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอมากขึ้นในท่อ แต่ทั้งเลขนี้สเกลและแรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความสูงและจำนวนปีก แต่จะลดลงตามอัตราส่วนของสนามการไหล สำหรับ $HR = 0.05$ ปัจจัยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนปีก แต่แสดงแนวโน้มตรงกันข้ามกับกรณีอื่น ๆ โดยค่า TEF มีค่าสูงสุด 1.27 ที่ $HR = 0.005$, $PR = 1.57$, $N = 8$ และ $Re = 6135$

Nakhchi et al. [6] ตรวจสอบการทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งเทปปิดสองชั้น โดยจะทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและปัจจัยที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เทปปิด ที่มีอัตราส่วนหน้าตัดแตกต่างกันสี่แบบคือ 0.25, 0.50, 0.75, 0.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.1 ภาพตัดส่วนของท่อที่ใช้ทดสอบ[6]

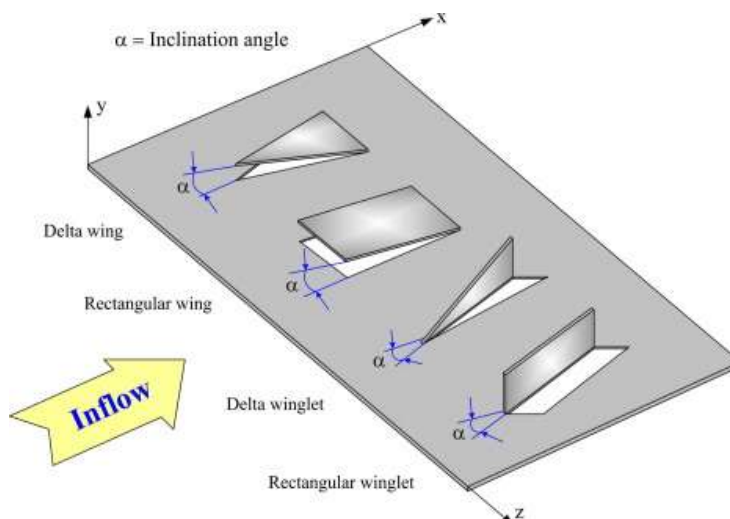
ผลที่ได้จากการทดลองคือ เลขนัสเซิลท์ (Nu) จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนหน้าตัดของเทปบิดสองชั้นเพิ่มขึ้น อัตราส่วนหน้าตัดของเทปบิดสองชั้นที่ 0.90 จะให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนที่ดีที่สุดและให้เลขนัสเซิลท์ (Nu) ที่สูงกว่าท่อธรรมดาถึง 177.4 % แต่ปัจจัยแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นถึง 489 % เมื่อเทียบกับท่อธรรมดา

Skullong et al. [7] ทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบหมุนเวียนในท่อกลมที่ให้ความร้อนพร้อมกับปีกแบบเดลต้าที่มีรูปทรงที่วางซ้ำ ๆ กันบนเทปพวนแบบไขว้ (PW-XT) โดยพารามิเตอร์ของปีกที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยความสูงปีกสัมพันธ์หรืออัตราส่วนการขวางกั้น ($BR = b/D = 0.1, 0.15, 0.2$ และ 0.25) และอัตราส่วนระยะพิทช์หรืออัตราส่วนพิทช์ ($PR = P/D = 0.5, 1.0, 1.5$ และ 2.0) และทำที่มุมเอียงหรือมุมโจมตีปีกเดลต้าเดี่ยว ($\alpha = 30^\circ$) และอัตราส่วนความพวนของปีกนก ($Ap/Aw = 0.359$) สำหรับเลขนัสเซิลท์ (Nu) ใช้ตั้งแต่ 4180 ถึง 26,000

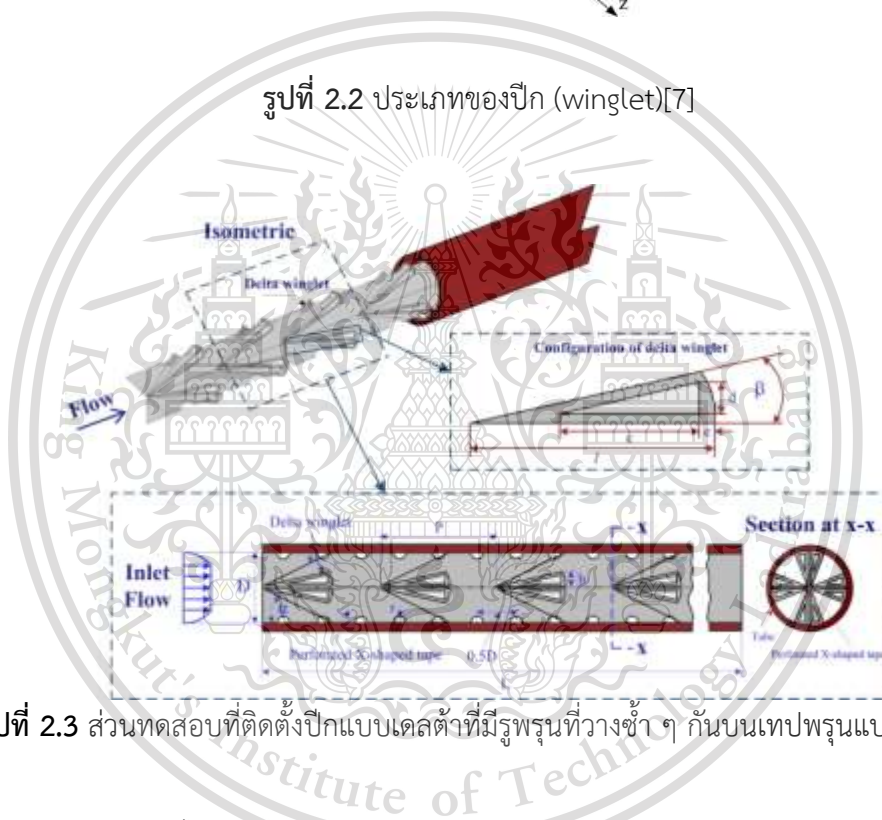
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.2 ประเภทของปีก (winglet)[7]



รูปที่ 2.3 ส่วนทดสอบที่ติดตั้งปีกแบบเดลต้าที่มีรูปทรงที่วางซ้ำ ๆ กันบนท่อพرونแบบไขว้[7]

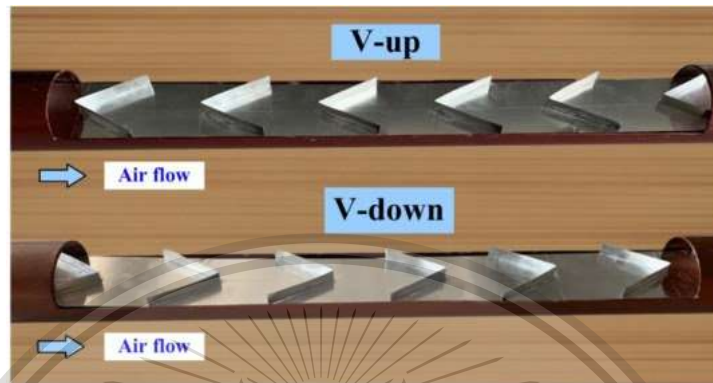
ผลที่ได้จากการทดลอง ได้การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันปรากฏในแง่ของเลขนัสเซิลท์ (Nu) และปัจจัยแรงเสียดทาน (f) แสดงให้เห็นว่าเลขนัสเซิลท์เพิ่มและอัตราส่วนการขวางกั้นเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนระยะพิทช์ลดลง ปัจจัยการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อน (TEF) จะได้รับการประเมิน และพบว่ามีความสูงที่สุดประมาณ 1.902 ดีกว่าเดิม 1.7 เท่า ที่อัตราส่วนการขวางกั้นเท่ากับ 0.15 อัตราส่วนระยะพิทช์เท่ากับ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

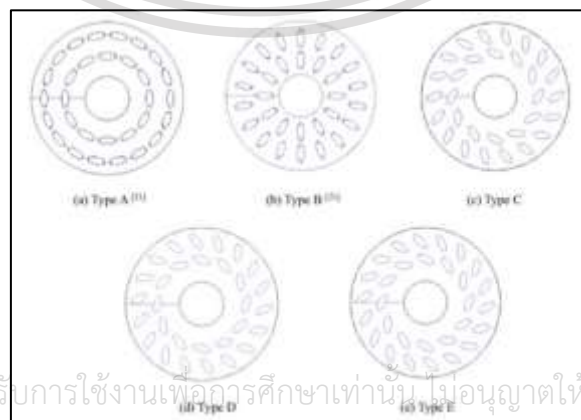
Promvongse et al. [8] การเสริมการถ่ายเทความร้อนโดยใช้อุปกรณ์การไหลแบบหมุนวนหรือแผ่นกั้นรูปตัววี นอกเหนือจากการเพิ่มความปั่นป่วนในท่อทำความร้อน การทำลายชั้นขอบเขตความร้อนจากการไหลวนของของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีจะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเช่นกัน



รูปที่ 2.4 ประเภทของปีกที่ทำการทดลอง[8]

แผ่นกั้นรูปตัววีช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับท่อเรียบ โดยแผ่นกั้นรูปตัววีทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแผ่นกั้นรูปตัววีหงาย 6 % แผ่นกั้นรูปตัววีทำให้ปัจจัยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) สูงสุดประมาณ 2.07 หรือประมาณ 1.4 % โดยเฉลี่ยสูงกว่าแผ่นกั้นรูปตัววีหงาย ดังนั้นแผ่นกั้นรูปตัววีจึงถือเป็นอุปกรณ์ที่เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดี

Cheng et al. [9] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาคอขวดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดลวดในการถ่ายเทความร้อนและการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบท่อรูปไข่ซึ่งช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอและความเร็วของการกระจายความร้อน



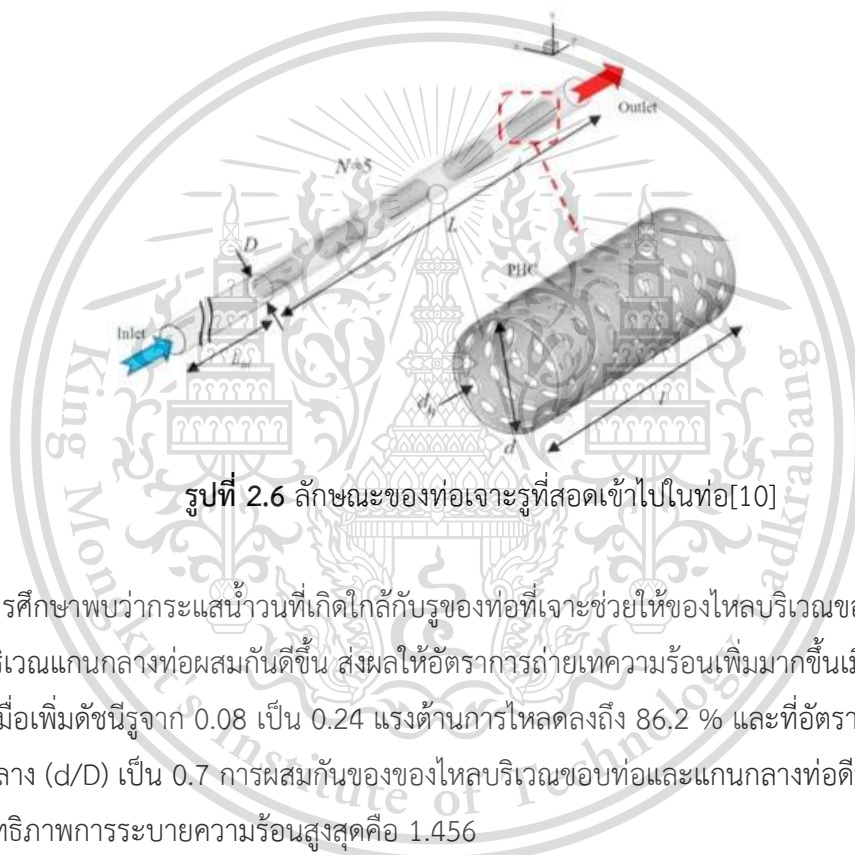
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดรูปที่ 2.5 แบบจำลองเค้าโครงท่อรูปไข่[9]เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การไหลของของไหลในท่อที่มีมุม (α) 70° และท่อแฉกนอกที่มีมุม (θ) 30° มีการกระจายอุณหภูมิและความเร็วของการถ่ายเทความร้อนที่ดีและสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่ออัตราการไหลของของไหลคือ 6 กก. ต่อ วินาที ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีที่สุดนั้นดีกว่าของเดิมประมาณ 50 %

Nakhchi et al. [10] ศึกษาลักษณะการไหลและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของของไหลผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อน โดยภายในมีการติดตั้งท่อกลางเจาะรู ซึ่งของไหลภายในอยู่ภายใต้การไหลแบบปั่นป่วน



รูปที่ 2.6 ลักษณะของท่อเจาะรูที่สอดเข้าไปในท่อ[10]

จากการศึกษาพบว่ากระแสความร้อนที่เกิดใกล้กับรูของท่อที่เจาะช่วยให้ของไหลบริเวณขอบท่อและของไหลบริเวณแกนกลางท่อผสมกันดีขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อปกติ เมื่อเพิ่มดัชนีรูจาก 0.08 เป็น 0.24 แรงต้านการไหลลดลงถึง 86.2 % และที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (d/D) เป็น 0.7 การผสมกันของของไหลบริเวณขอบท่อและแกนกลางท่อที่ดีที่สุดทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนสูงสุดคือ 1.456

Younes Menni et al. [11] มีการเจาะรูวงกลมไว้ในแผ่นกั้นที่ฝังอยู่ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (THE) เพื่อลดแรงดัน โดยต้องทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนสูงสุดด้วยขนาดและน้ำหนักรูที่เล็ก การมีรูของแผ่นกั้นต่อการลดการสูญเสียแรงดันสามารถลดลงได้ประมาณ 34 % จากกรณี $nb = 1$, $d/D = 0.4$, $Reg = 30$ การลดลงของแรงดันที่เกิดจากอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (d/D) ที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการระบายความร้อนที่เลขเรย์โนลด์ (Re) เท่ากับ 200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดย King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดเมื่อเทียบกับที่ $d/D = 0.1$ และ 0.26 มีค่า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

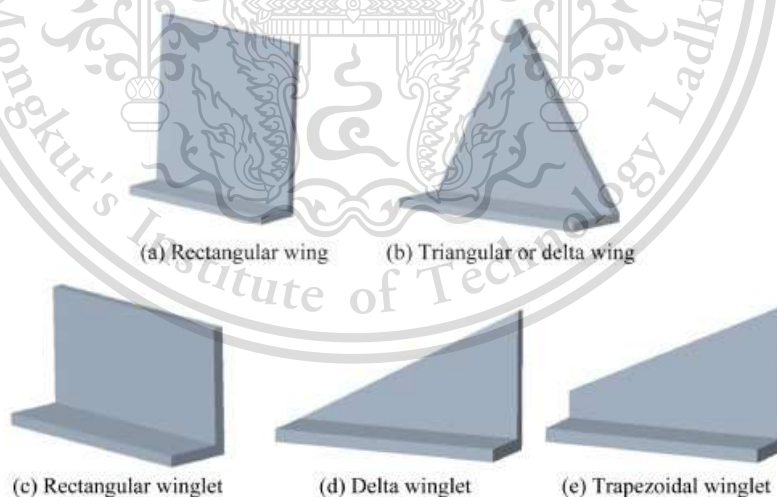
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

LeeHsiao Mun et al. [12] ศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเครื่องกำเนิดกระแสไหลวนทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (VGs) ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบัดด้วยวิธีเชิงตัวเลข ค่า VG ที่เหมาะสมทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ดีที่สุดคือ $RVG/RO = 1.55$ และ $HVG/Fp = 0.8$ การประเมินประสิทธิภาพ (PEC) อยู่ที่ 1.3-1.5 เท่า ของเลขเรย์โนลด์ (Re) เดียวกัน

Promvonge et al. [13] การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงทดลองและเชิงตัวเลขเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยมีพลาซมาความร้อนที่ผนังสม่ำเสมอในระบบการไหลแบบปั่นป่วน (DW) ที่ $RB = 0.2$ และ $RP = 0.5$ ให้ค่าแรงเสียดทานและเลขนัสเซลท์ (Nu) มากที่สุด โดยมีค่าแรงเสียดทานคือ 3.8 เท่าและค่านัสเซลท์ (Nu) คือ 18.8 เท่า ที่ $RB = 0.15$ และ $RP = 1.0$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มประสิทธิภาพความร้อน (TEF) มากที่สุด โดยมีค่า 1.99 เท่า และ 2.02 เท่า สำหรับ V-up และ V-down

Modi et al. [14] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบัดและท่อโดยใช้เครื่องกำเนิดกระแสไหลวนแบบปีกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรูเจาะวงกลม โดยประเมินประสิทธิภาพเทอร์โมไฮดรอลิกของครีบบัดและท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (FTHE) ที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไหลวนแบบปีกสี่เหลี่ยม (RWVG) ที่มีรูเจาะวงกลม 1, 2, 4 และ 6 รู เปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไหลวนแบบปีกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีและไม่มีรูเจาะวงกลม

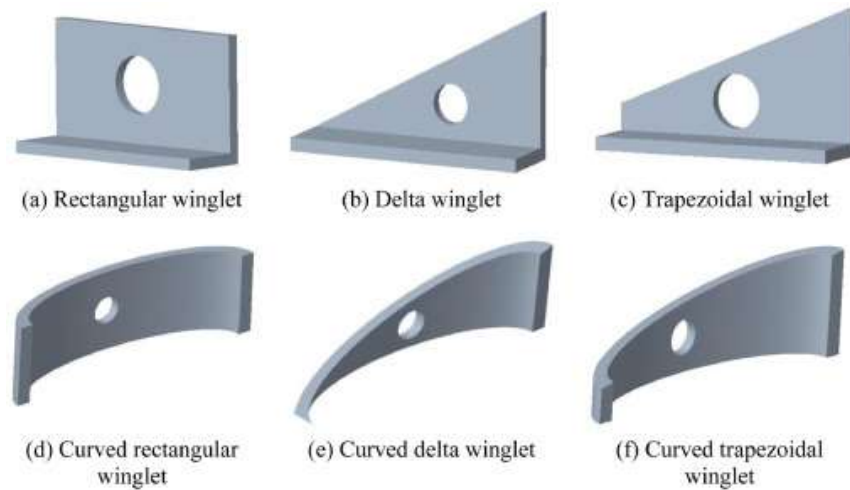


รูปที่ 2.7 ประเภทของปีกแบบไม่มีรูเจาะวงกลม[14]

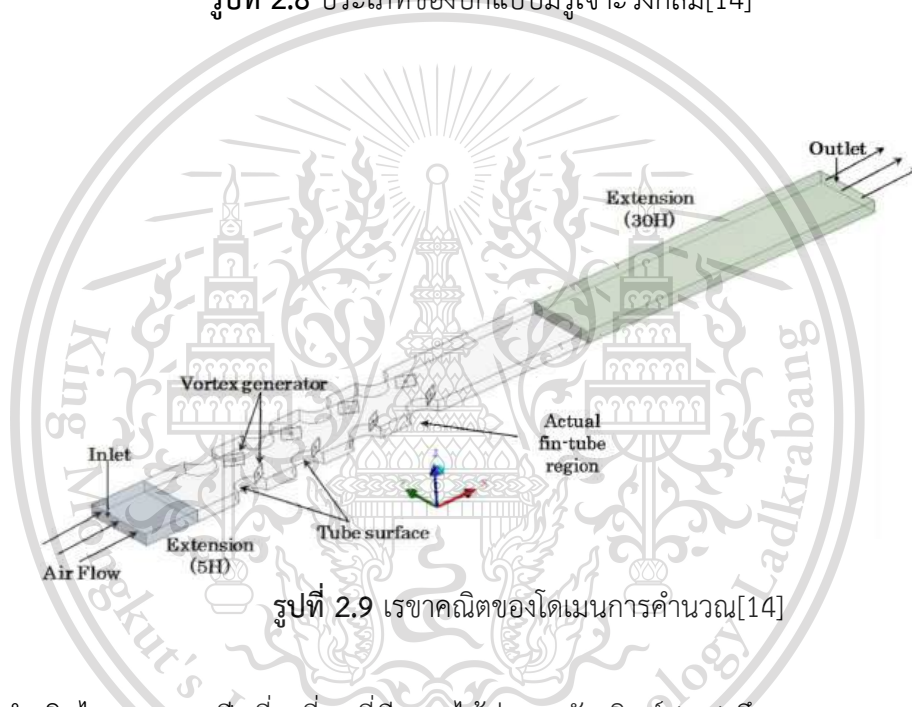
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.8 ประเภทของปีกแบบมีรูเจาะวงกลม[14]



รูปที่ 2.9 เรขาคณิตของโดเมนการคำนวณ[14]

เครื่องกำเนิดไหลวนแบบปีกสี่เหลี่ยมที่มี 6 รู ได้ค่าเลขนัสเซิลท์ (Nu) ถึง 45.95% และ 57.37% สำหรับเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 400 และ 2000 ตามลำดับ โดยลดปัจจัยเสียดทานลง 13.81% ซึ่งประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสามารถทำได้ด้วยเครื่องกำเนิดไหลวนแบบปีกสี่เหลี่ยมที่มีรูเจาะวงกลม 6 รู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย

จากการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อกลมรูปแบบต่าง ๆ จากงานวิจัยที่ได้ศึกษามาจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนระยะพิทช์, รูปทรงและความสูงของปีก รวมถึงโครงสร้างปีกแบบรูปต่าง ๆ นั้นล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพและสมรรถนะทางความร้อน ซึ่งในการศึกษานี้สามารถนำแนวคิดต่าง ๆ มาปรับใช้ในการประยุกต์พัฒนาปีกและตัวสร้างการหมุนควงตามแนวยาวมาติดตั้งภายในท่อ โดยพิจารณา รูปทรง, ขนาด, มุมและระยะพิทช์ รวมถึงชนิดของวัสดุที่ใช้สร้างปีก ที่จะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในท่อหรือการสูญเสียความดันและแรงเสียดทานเพื่อควบคุมกลไกการไหลภายในท่อ การศึกษางานวิจัยเหล่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษารทดลองที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มีการใส่ปีกที่ช่วยสร้างการหมุนควงตามแนวยาวของของไหลไว้ภายในท่อกลม และเพื่อการศึกษาหาวิธีการที่ดีที่สุดรวมถึงค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต่าง ๆ ในการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อน อีกทั้งเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้วิธีที่ดีที่สุดกับสถานการณ์และพัฒนาเทคโนโลยีให้ดีกว่าที่มีในปัจจุบันให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น เช่น การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากขึ้นเพื่อไม่ให้สูญเสียพลังงานอย่างเปล่าประโยชน์ หากสามารถออกแบบและพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ จะทำให้มีส่วนช่วยในการใช้พลังงานและทรัพยากรอย่างคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น รวมถึงช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการของงานวิจัย เกี่ยวกับการไหลภายในท่อ การถ่ายเทความร้อนภายในท่อ ปัจจัยเสียดทานที่เกิดภายในท่อ ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน (Thermal performance Enhancement Factor, TEF) กลศาสตร์ของของไหลเบื้องต้นและค่าความดันตกคร่อม สำหรับท่อกลมที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยนำความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีการพาความร้อนแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อ (Forced convection for flow inside ducts) มาใช้เป็นแนวทางในการอธิบายกลศาสตร์ของไหล สมดุลพลังงาน การถ่ายเทความร้อน สหสัมพันธ์การพาความร้อนในรูปแบบต่างๆ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

3.2 กลศาสตร์ของไหล

การไหลภายในท่อมักมีขอบเขตจำกัด โดยที่ความหนาของชั้นขอบเขตการไหลไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้เพราะว่าเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งชั้นขอบเขตการไหลก็ก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อ จึงไม่สามารถขยายออกไปได้อีก รูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ซึ่งการไหลลักษณะเช่นนี้ เรียกว่าการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed flow) ส่วนการไหลก่อนหน้านี้นี้ เรียกว่าการไหลที่กำลังปรับตัว (developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า hydrodynamic entrance region

ตัวพารามิเตอร์ความดันตกคร่อมเกี่ยวข้องกับกำลังงานของพัดลมโดยตรงยิ่งความดันตกคร่อมมาก จำเป็นต้องใช้กำลังขับเคลื่อนของไหลมาก

ความดันตกคร่อมของของไหล, Δp

$$\Delta p = f \frac{\rho L \bar{V}^2}{2D} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

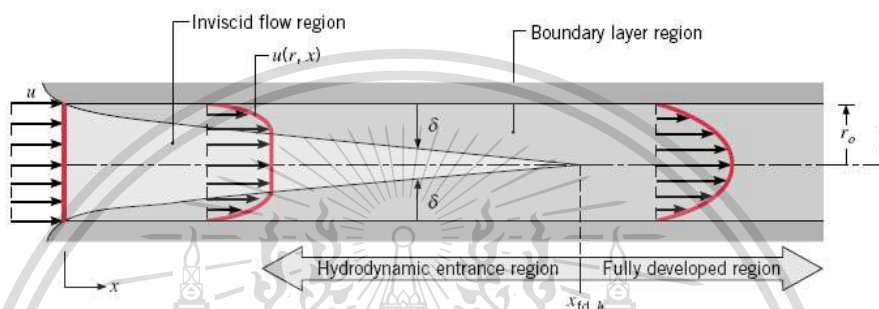
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การจ่ายกำลังให้พัดลม , \dot{W}_{in}

$$\dot{W}_{in} = Q\Delta p \quad (3.2)$$

3.2.1 สถานะของไหล

พิจารณการไหลแบบราบเรียบในท่อกลมที่มีรัศมี r_o ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การก่อตัวของชั้นขอบเขตการไหลของการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม

สำหรับการไหลภายในท่อนั้นต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นอย่างไร แบบราบเรียบหรือปั่นป่วน เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลภายในท่อกลมกำหนดเป็น

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

เมื่อ u_m คือ ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

เลขเรย์โนลด์วิกฤติสำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากราบเรียบเป็นปั่นป่วนเริ่มต้นจาก $Re_{D,c} \approx 2,300$ และการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ ที่ $Re_D \geq 4000$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ($Re_D < 2,300$) ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวหาได้จากสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วน ($Re_D \geq 4000$) ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับเลขเรย์โนลด์ และมีค่าประมาณดังนี้

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

สำหรับค่าที่ใช้ในที่นี้เราจะสมมุติว่า $x_{fd} > 30D$ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

3.2.2 ความเร็วเฉลี่ย

ความเร็วภายในท่อตลอดทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อจะใช้ความเร็วเฉลี่ย u_m (mean velocity) แทน โดยนิยามว่า ความเร็วเฉลี่ย คือ ความเร็วคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อและความหนาแน่นของของไหล จะเท่ากับอัตราการไหลของมวล

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

การไหลในสภาวะคงที่ ที่อัดตัวไม่ได้ภายในท่อและพื้นที่หน้าตัดคงที่ ค่า \dot{m} และ u_m ย่อมมีค่าคงที่ตลอดความยาวท่อ

ค่าของเลขเรย์โนลด์สำหรับท่อกลม ($A_c = \pi D^2/4$) จะลดรูปเป็น

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

เพราะว่าค่า \dot{m} อาจหาได้จากการอินทิเกรตของฟลักซ์มวล (ρu) ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด

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

ดังนั้นสำหรับท่อกลม กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ จะได้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

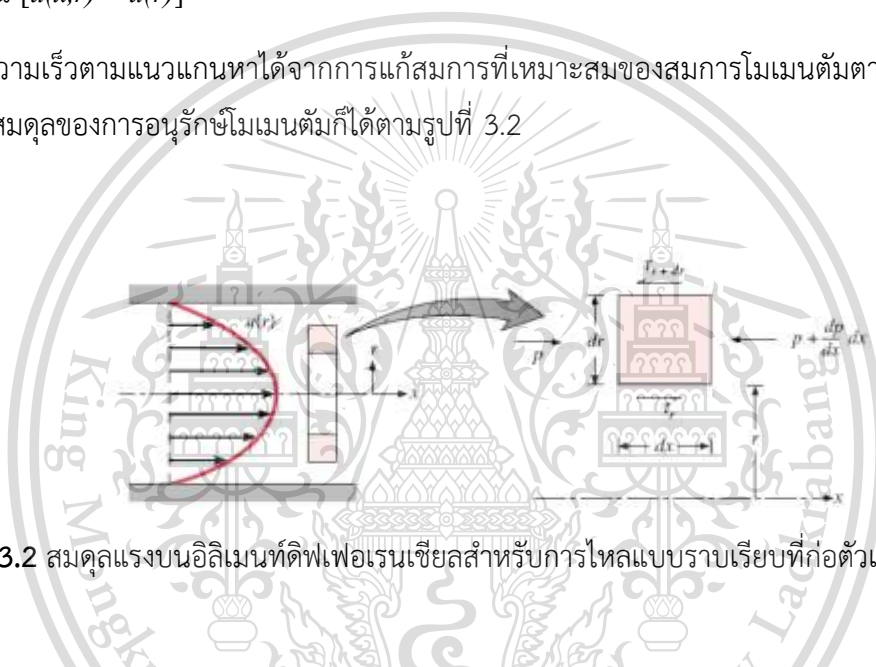
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

รูปทรงของความเร็วสามารถหาได้ สำหรับการไหลแบบราบเรียบของของไหลที่คุณสมบัติคงที่อัดตัวไม่ได้ ในช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้วของท่อกลม (สำหรับปั่นป่วน ส่วนใหญ่ต้องอาศัยผลจากการทดลองเป็นหลัก) โดยทั่วไปจะเป็นฟังก์ชันของรัศมี

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

ความเร็วตามแนวแกนหาได้จากการแก้สมการที่เหมาะสมของสมการโมเมนตัมตามแนว x หรือหาโดยคิดสมดุลของการอนุรักษ์โมเมนตัมก็ได้ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สมดุลแรงบนอิลิเมนต์ดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ก่อตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม

สำหรับอิลิเมนต์ดิฟเฟอเรนเชียลรูปวงแหวนของรูปที่ 3.2 สามารถเขียนสมดุลของแรงได้ดังนี้

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

ซึ่งลดรูปเป็น

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ดังนั้น (3.11) จะเป็นดังนี้

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

เพราะว่า dp/dx นั้นไม่ขึ้นกับ r ดังนั้นเราสามารถอินทิเกรต (3.12) ได้

$$r \frac{du}{dr} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) \frac{r^2}{4} + C_1 \quad (3.13)$$

และ

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

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

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

ดังนั้นรูปทรงของความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว จะเป็นพาราโบลา และจะสังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน (dp/dx) ต้องเป็นลบเสมอ

ผลลัพธ์ที่กล่าวมานี้อาจใช้หาค่าความเร็วเฉลี่ยได้ (u_m) โดยแทนสมการ (3.15) ใน (3.9) แล้วอินทิเกรต จะได้

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

แทนสมการ (3.16) ใน (3.15) จะได้รูปร่างของความเร็วเป็น

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

เพราะว่า u_m สามารถหาได้จากการรู้อัตราการไหลของมวล ดังนั้นสมการ (3.16) สามารถใช้หาเกรเดียนต์ของความดันได้ (dp/dx)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว

ปกติวิศวกรมักสนใจเกี่ยวกับความดันตกคร่อมในการไหลภายในท่อ เนื่องจากตัวพารามิเตอร์นี้ เกี่ยวข้องกับการหาขนาดกำลังงานของปั๊มหรือพัดลมโดยตรงในการหาความดันตกคร่อมเราจะใช้ตัวประกอบเสียดทานของ Moody (Darcy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยนิยามว่า

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

ค่านี้ต่างกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน C_f ซึ่งบางครั้ง เรียกว่า ตัวประกอบเสียดทาน

เฟนนิ่ง ซึ่งนิยามว่า

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

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

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

สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (3.21)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่แล้วการวิเคราะห์ยุ่งยากมากกว่าต้องใช้ผลจากการทดลองตัวประกอบเสียดทานสำหรับค่าเลขเรย์โนลด์ต่าง ๆ ได้แสดงในไดอะแกรม

ของ Moody ในรูปที่ 3.3 ตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์และสภาวะผิวของท่อ ซึ่งจะ มีค่าน้อยสำหรับผิวเรียบและเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหยาบของผิว (e) เพิ่มขึ้นโดยประมาณดังนี้

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

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

นอกจากนี้เรารู้ว่าความดันตกคร่อม (Δp) ระหว่างระยะ x_1 ถึง x_2 เป็น

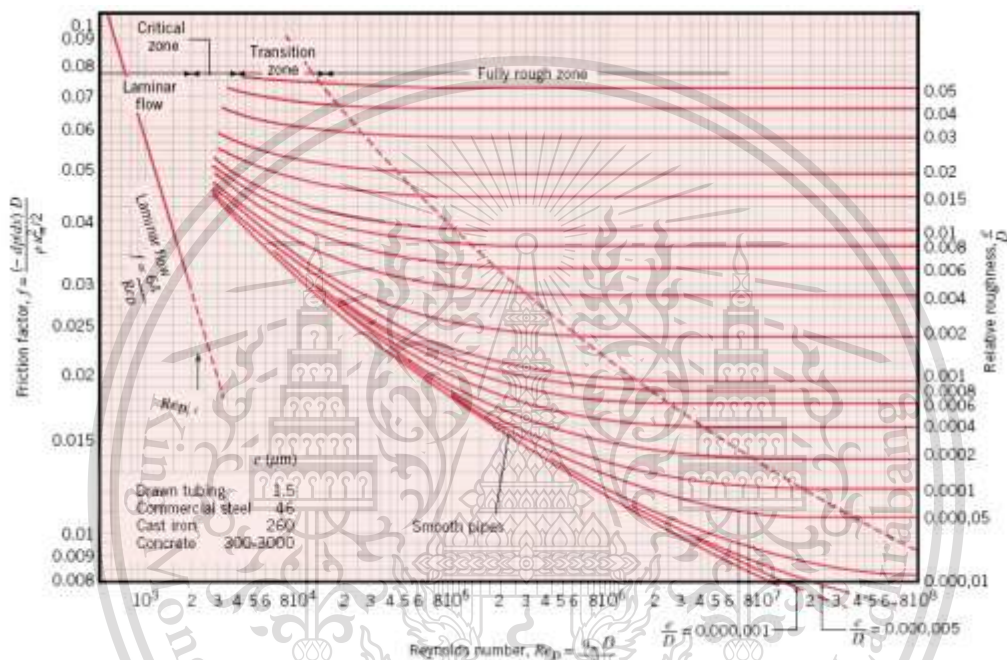
$$\Delta p = - \int_{p_1}^{p_2} dp = f \frac{\rho u_m^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx = f \frac{\rho u_m^2}{2D} (x_2 - x_1) \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ซึ่งค่า f หาจากรูปที่ 3.3 หรือจากสมการ (3.21) สำหรับการไหลแบบราบเรียบ และจากสมการ (3.22) และ (3.23) สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมผิวเรียบ แผนภูมิดังรูปที่ 3.3 แบ่งออกเป็นสี่ช่วง คือ ช่วงการไหลแบบราบเรียบ ช่วงวิกฤต ซึ่งไม่แน่ว่าการไหลเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน ช่วงเปลี่ยนแปลง ซึ่ง f เป็นฟังก์ชันกับเลขเรย์โนลด์และขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาทำท่อ จะมีผลต่อความขรุขระของผิวท่อได้ โดยพิจารณาในรูปของความขรุขระสัมพัทธ์ (relative roughness, ϵ/D)



รูปที่ 3.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม

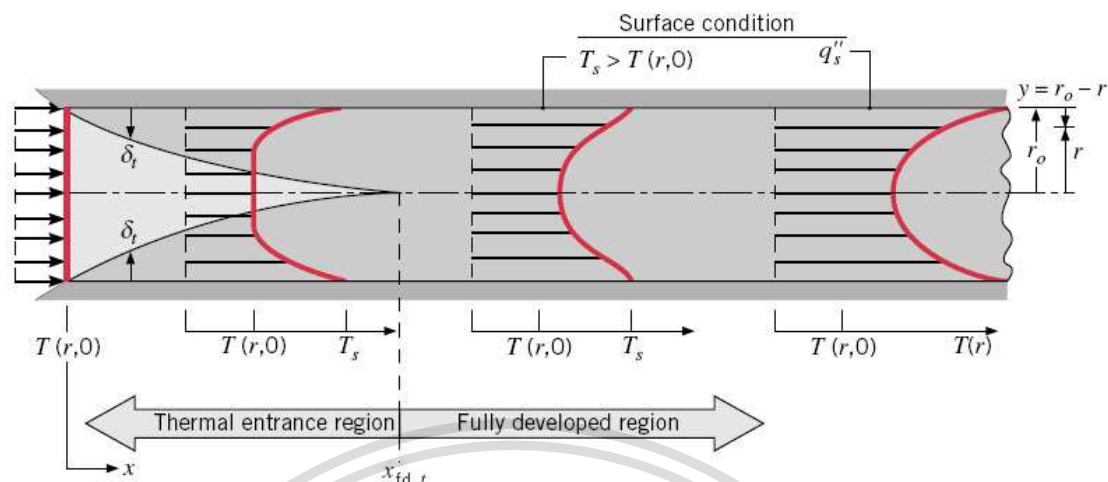
3.3 การถ่ายเทความร้อน

ถ้าของไหลไหลเข้าไปในท่อตามรูปที่ 3.4 ที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ $T(r, 0)$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขอบเขตการไหลของความร้อนจะเริ่มตันก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่ โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอคงที่ ($T_s = \text{คงที่}$) หรือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ ($q_s'' = \text{คงที่}$) สภาวะที่ปรับตัวคงที่แล้วของความร้อน (thermally fully developed condition) ก็จะทำให้เกิดชั้นในที่สุดรูปร่างของอุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะแตกต่างกันตามเงื่อนไขไม่ว่าอุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.4 การก่อตัวของชั้นของเขตทางความร้อนในท่อกลม
สำหรับการไหลแบบราบเรียบระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัว

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย

ในการพิจารณาอุณหภูมิของของไหลที่ไหลในท่อนั้น จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) ของหน้าตัด เนื่องจากการกระจายอุณหภูมิในช่วงหน้าตัดใด ๆ จะไม่คงที่ ดังนั้นจึงพิจารณาอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิเฉลี่ย โดยให้ความหมายดังนี้

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

สำหรับท่อกลม และเป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้

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

ค่าของ T_m จะเปลี่ยนตามแนวยาวของท่อ, x ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหลซึ่งต่างจาก u_m มีค่าคงที่ สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

ฟลักซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใด ๆ หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน ดังนี้

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

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

3.3.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed conditions)

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของไหลยังคงเปลี่ยนแปลงตามระยะ x สิ่งหนึ่งที่ยากรู้คือเกิดสภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้วทางความร้อน (thermal fully developed) หรือยัง สถานการณ์นี้จะแตกต่างไปจากกรณีการไหลของของไหลที่ $(\partial u/\partial x)=0$ ในช่วงบริเวณปรับตัวเต็มที่แล้ว ในทางกลับกัน ถ้ามีการพาความร้อนแล้ว (dT_m/dx) เช่นเดียวกับ $(\partial T/\partial x)$ ที่รัศมี r ใด ๆ จะไม่เป็นศูนย์ ผลที่ตามมาคือรูปร่างของอุณหภูมิ $T(r)$ จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ x ซึ่งเปรียบเสมือนว่า สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิเพื่อให้ได้เงื่อนไขนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิผิวท่อ

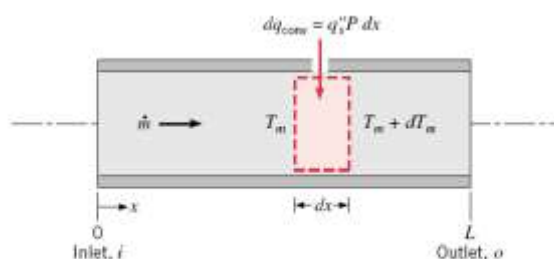
T คือ อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใด ๆ

T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (3.29) ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่อ อาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่หรือ T_s คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ในผนังท่อที่ได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอ จะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนกรณี T_s คงที่ จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสภาวะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

3.4 การสมดุลของพลังงาน

การสมดุลของพลังงาน (energy balance) พิจารณาการไหลในท่อตามรูปที่ 3.5 ของไหลไหลด้วยอัตราการมวลคงที่ \dot{m} และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของของไหล รวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางตามแนวแกนจะไม่นำมาคิด ดังนั้นถ้าไม่มีงานเพลลาซึ่งกระทำโดยของไหลขณะไหลผ่านท่อแล้ว จะมีเพียงอิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและงานจากการไหลเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

งานของการไหลเป็นงานที่ใช้เคลื่อนของไหลผ่านปริมาตรควบคุม คิดต่อหน่วยมวลของไหลและ จะอยู่ในรูปของผลคูณของความดัน p และปริมาตรจำเพาะ v (ซึ่ง $v=1/\rho$) โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 3.5 และจากนิยามของ T_m จะได้

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

หรือ

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

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

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

สมการนี้สามารถใช้ได้ดีสำหรับของเหลวที่อัดตัวไม่ได้เช่นกันในกรณีนี้ $c_v=c_p$ เพราะว่ v น้อยมาก ๆ $d(pv)$ โดยทั่วไปจะน้อยกว่า $d(c_v T_m)$ มากจนตัดทิ้งได้

รูปของสมการ (3.32) เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขสำหรับท่อทั้งหมด โดยการอินทิเกรตจากทางเข้าจนถึง ทางออกของท่อ จะได้

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

โดยที่ q_{conv} เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h

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

อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, T_b

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

เลขนัสเซิลท์

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

เงื่อนไขความร้อนที่ผิว คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (constant Surface heat flux) โดยตีตแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.5 สหพันธ์การพาความร้อนการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม

ในช่วงบริเวณที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed region) ที่จุดใด ๆ ในท่อสมการของพลังงานจะเป็นดังนี้

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

เทอมทางซ้ายมือของสมการ (3.37) เป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการพา

และเทอมทางขวามือเป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการนำ ในทิศทางตามแนวรัศมี

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

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

ซึ่งเทอม $\left(\frac{2u_m}{\alpha} \right) \left(\frac{dT_m}{dx} \right)$ คงที่โดยการแยกตัวแปรและอินทิเกรต 2 ครั้ง จะได้

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

ค่าคงที่ของการอินทิเกรต C_1 และ C_2 หาจากเงื่อนไขที่ขอบดังนี้

T ที่ $r=0$ หรือ $(\partial T/\partial r=0$ ที่ $r=0$) จะได้ $C_1=0$ และ $T(r_o)=T_s$ ที่ซึ่ง T_s แปรตามระยะทาง, x จะได้ $C_2=T_s - \left(\frac{2u_m}{\alpha} \right) \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \left(\frac{3r_o^2}{16} \right)$ ดังนั้นสำหรับช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้วและพลั๊กซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ที่จะได้ การกระจายของอุณหภูมิในรูป

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

เมื่อรู้การกระจายของอุณหภูมิ ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ก็สามารถหาได้ เช่น ถ้าทราบรูปร่างของความเร็วและอุณหภูมิตามสมการ (3.15) และ (3.40) โดยแทนในสมการ (3.27) และอินทิเกรตทั่วทั้ง r จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $T_m = T_s - \frac{11}{48} \left(\frac{u_m r_o^2}{\alpha} \right) \left(\frac{dT_m}{dx} \right)$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ (3.41) ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

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

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

จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน สมการ (3.28) และ (3.42) ได้ว่า

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

หรือ

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

ดังนั้นในท่อกลมที่มีคุณลักษณะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ การไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ค่าเลขนัสเซลท์จะคงที่ ไม่ขึ้นกับ Re_D , Pr และตำแหน่งตามแนวแกน x

3.6 สหพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม

สมการหา Nu_x สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลมเรียบ เสนอโดย Colburn ซึ่งได้มาจาก Chilton-Colburn analogy

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

แทน f จากสมการ (3.23) สมการของ Colburn เป็น

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

Dittus-Boelter ได้เสนอสมการเป็น

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

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

และ $n = 0.3$ สำหรับการทำให้เย็น ($T_w < T_m$) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้ได้รับการยืนยันจากผลการทดลองสำหรับช่วงของเงื่อนไขดังนี้

$$\left[\begin{array}{l} 6000 \leq Re_D \leq 10^7 \\ 0.5 \leq Pr \leq 120 \\ L/D \geq 60 \end{array} \right]$$

สมการต่าง ๆ นี้จะใช้เพียงเฉพาะกรณีย่อย ๆ ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ ($T_s - T_m$) ไม่มากนักโดยคุณสมบัติต่าง ๆ คิดที่ T_m สำหรับการไหลที่แสดงลักษณะการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติมาก Seider และ Tate ได้แนะนำให้ใช้สมการต่อไปนี้

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

สำหรับ

$$\left[\begin{array}{l} 6000 \leq Re_D \leq 10^7 \\ 0.7 \leq Pr \leq 10,000 \\ L/D \geq 60 \end{array} \right]$$

โดยที่คุณสมบัติต่าง ๆ ยกเว้นค่า μ_s หาที่ T_m โดยที่ μ_s หาที่ T_w

3.7 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (heat transfer enhancement) โดยการทำให้เกิดกระแสนวนด้วยการสอดใส่ครีบบสามเหลี่ยมปีกคู่ตามรูปที่ 3.6 การสอดใส่นี้ประกอบด้วยครีบบสามเหลี่ยมปีกคู่ เป็นผลให้ความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วสัมผัสบริเวณผนังท่อเพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นผลให้เกิดความดันตกคร่อม (Pressure drop) มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

การออกแบบอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึง การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม ที่มีการติดตั้งผนังกัน มีการแสดงรายละเอียดในส่วนเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงวิธีการทดลองในแต่ละขั้นตอนและการเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง ได้มีการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากท่อเปล่า โดยพิจารณาจากการติดตั้งผนังกัน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของผนังกัน เช่น มุมปะทะของผนังกัน อัตราส่วนความสูงของผนังกัน ระยะพิทช์ เป็นต้น

ทั้งนี้ยังได้มีการกล่าวถึงเรื่อง สมการในการวิเคราะห์ข้อมูลการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ โดยการถ่ายเทความร้อนในพจน์ของเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number) และการสูญเสียความดันในพจน์ของตัวประกอบเสียดทาน (friction factor) จากนั้นมีการเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดันกับท่อที่มีผนังเรียบ และสมรรถนะความร้อน (thermal enhancement factor) โดยวิเคราะห์ที่กำลังขับเดียวกัน

4.2 การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลอง

4.2.1 พัฒน

การกำหนดขนาดของพัฒน ได้ทำการพิจารณาที่เลขเรย์โนลด์ $Re = 2,300$ ซึ่งเป็นการทำงานของพัฒนในช่วงรับภาระสูงสุด โดยท่อที่ใช้ทดสอบทำจากทองแดง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D_i) = 50 มิลลิเมตร หนา (t) = 1.5 มิลลิเมตร และยาว (L) = 4,000 มิลลิเมตร มีการแบ่งช่วงที่ใช้ทดสอบยาว 2,000 มิลลิเมตร

จากตารางคุณสมบัติอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 318 K จะได้ $\rho = 1.099712 \text{ kg/m}^3$ และ $\mu = 191.3992795 \times 10^{-7} \text{ N.s/m}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากสมการเลขเรย์โนลด์

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

หาความเร็วเฉลี่ย

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \frac{Re_D \mu}{\rho D} \\ &= \frac{25,000 \times 191.3992795 \times 10^{-7}}{1.099712 \times 0.050} \\ &= 8.70 \text{ m/s} \end{aligned}$$

จากสมการ

$$\begin{aligned} Q &= \bar{V} A_c \\ &= \frac{8.70 \times \pi \times 0.050^2}{4} \\ &= 0.0171 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 1.0252 \text{ m}^3/\text{min} \end{aligned}$$

ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงกำหนดให้ใช้พัดลม ที่สามารถให้อัตราการไหลมากกว่า 1.0252 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

4.1.2 ท่อทางเข้าชุดทดลอง

โดยการไหลแบบราบเรียบ ($Re_D \leq 2,300$) มีความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัว หาได้จากสมการ

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

เลขเรย์โนลด์วิกฤติ สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากแบบราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_{D,c} \approx 2,300$ และการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่ เมื่อ $Re_D \geq 4,000$

ส่วนการไหลแบบปั่นป่วน ($Re_D \geq 4,000$) ไม่มีสมการที่แน่นอนในการหาระยะทางสำหรับการปรับตัวเต็มที่ แต่สามารถรู้ได้ว่าไม่มีความเกี่ยวข้องกับเลขเรย์โนลด์และมีค่าประมาณดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ซึ่งค่าที่ใช้ในที่นี้ จะสมมุติว่า $x_{fd} = 30D_h$ เป็นการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed flow)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad x_{fd} &= 30D_h \\
 &= 30 \times 0.048 \\
 &= 1.44 \text{ m}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ในการศึกษาเรื่องดังกล่าวจึงกำหนดให้ท่อทางเข้าสู่ชุดทดลองมีความยาว 2 เมตร

ในการทดลองชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถแบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่หนึ่ง การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

ขั้นตอนที่สอง การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง

ขั้นตอนที่สาม การทดลองและเก็บผลการทดลอง

4.3 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

ในการศึกษาผลของความสูงแผ่นกั้น ระยะพิทช์ และรูปแบบการจัดวางแผ่นกั้น ซึ่งเป็นงานวิจัยเชิงการทดลอง รวมไปถึงการจัดเตรียมและสร้างอุปกรณ์ในการทดลอง มีรายละเอียดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ดังต่อไปนี้

4.3.1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่มีแผ่นกั้น ซึ่งสร้างการหมุนควงตามแนวยาว โดยติดตั้งแผ่นกั้นตามแนวยาวของท่อตลอดช่วงการทดสอบ ได้มีการติดตั้งแผ่นกั้นเข้าไปภายในท่อและเปรียบเทียบผลการทดลองกับท่อผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

ในส่วนในช่วงการทดลองจะใช้เป็นท่อกลมที่ทำมาจากทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร และยาว 4 เมตร ซึ่งในช่วงของการทดสอบจะมีความยาว 2 เมตร มีการหุ้มฉนวน โดยในชั้นแรกใช้วัสดุเป็นฉนวนใยแก้ว ฉนวนชั้นที่สองเป็นแผ่นกระเบื้อง ฉนวนชั้นที่สามเป็นฉนวนใยแก้ว และชั้นที่สี่หุ้มด้วยฉนวนที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศ เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอก

4.3.2 แหล่งจ่ายอากาศ

แหล่งจ่ายอากาศ ใช้พัดลม (high-pressure blower) MODEL TB-150 เป็นพัดลมแบบหอยโข่ง แรงดันสูง 12 ใบพัด ขนาด 1.5 kW หรือ 2 HP ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 V ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 พัดลมแบบหอยโข่งแรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

มอเตอร์ (motor) เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน ขนาด 1.5 kW ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 V, 50 Hz, 2900 rpm, 14.8 A ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 มอเตอร์

อินเวอร์เตอร์ (inverter) Omron Inverter, 3G3JX-A4037, 380-480 V 3 เฟส 3.7 kW 5 HP เป็นอินเวอร์เตอร์แบบปรับความถี่ (frequency Inverter) ถูกนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบที่ใช้ขับเคลื่อน เป็นการควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตามที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบออริฟิส (orifice meter) เป็นอุปกรณ์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศตรงทางเข้าชุดทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 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 4.5 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบออริฟิส

เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (inclined manometer) รุ่น Mark II Model No.25 ใช้วัดความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลัง Orifice meter เพื่อใช้อัตราการไหลของอากาศ และความแตกต่างของความดัน ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากความแตกต่างของระดับ red gage oil (specific gravity = 0.826) ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง

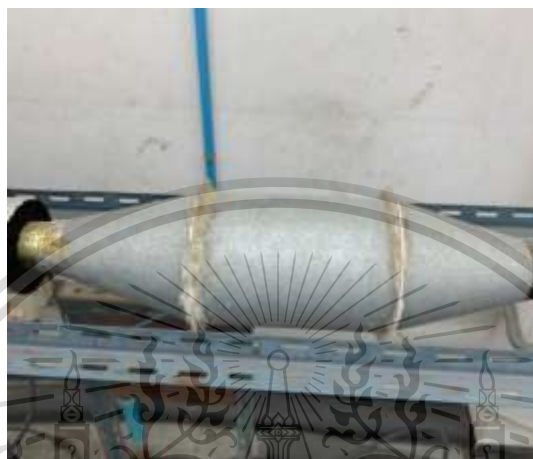
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมี... และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.4 ถังพักลม

ถังพักลม (settling tank) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้จัดเรียงและปรับสภาพการไหลของอากาศ เพื่อให้เกิดการปั่นป่วนน้อยที่สุดก่อนเข้าสู่ท่อ ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการทดสอบ โดยลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม มีตะแกรงด้านใน ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ถังพักลม

4.3.5 อุปกรณ์ควบคุมฟลักซ์ความร้อนของแผ่นฮีตเตอร์

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (voltage regulator) โดยใช้เครื่องปรับความต่างศักย์ไฟฟ้า รุ่น TDGC 2-3 KVA CAPACITY: 3000 VA MAX. 12 Amp เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับแผ่นฮีตเตอร์ เพื่อทำการควบคุมฟลักซ์ความร้อนของแผ่นฮีตเตอร์ให้ได้ตามที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 4.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

R3000 series Color Paperless Recorder, SUPCON เป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูล (recorder) และแสดงผลอุณหภูมิ สามารถแสดงค่าอุณหภูมิได้ทั้งหมด 12 ค่า ใช้งานโดยการเชื่อมต่อเครื่องเข้ากับเทอร์โมคัปเปิล ทั้งหมด 12 ตัว จำนวน 2 เครื่อง เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวจำนวน 12 ตำแหน่ง รวมไปถึงอุณหภูมิทางเข้าและทางออกส่วนทดสอบอีก 2 ตำแหน่ง ทั้งหมดจึงเป็น 14 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เครื่องเก็บข้อมูล

คอมพิวเตอร์ รุ่น Toshiba Satellite M50 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับเครื่องเก็บข้อมูล (recorder) เพื่อใช้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิว รวมไปถึงอุณหภูมิทางเข้าและออกของส่วนทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 คอมพิวเตอร์ รุ่น Toshiba Satellite M50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.11 เทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิผิวครีบ โดยใช้วัดอุณหภูมิที่ทางเข้าครีบ และทางออกครีบ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบชนิด K จำนวน 10 ตัว เพื่อวัดอุณหภูมิผิวทั้งหมด 10 ตำแหน่ง และใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ RTD Pt100 เพิ่มอีกจำนวน 2 ตัว เพื่อทำการวัดอุณหภูมิทางเข้าและทางออกส่วนทดสอบ

4.3.7 เครื่องวัดความดันตกคร่อม

เครื่องวัดความดันตกคร่อม (differential pressure gages) รุ่น Dwyer 475 Mark III ช่วงการใช้งานอยู่ที่ 0-10.00 IN W.C. (0-2.49 kPa) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันตกคร่อมระหว่างส่วนทดสอบ ทั้งกรณีเป็นท่อผิวเรียบ และกรณีที่มีการติดตั้งปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด เพื่อหาการสูญเสียความดันในช่วงของการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในสถานศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 4.12 เครื่องวัดความดันตกคร่อม, Dwyer 475 Mark III Digital Manometer

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.8 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ

เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (vane-type anemometer) รุ่น 445 ยี่ห้อ TESTO เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วของลมที่ตำแหน่งทางออกของชุดออริฟิส ใช้เพื่อทำการเปรียบเทียบ (calibration) ความเร็วของลมในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (vane-type anemometer), TESTO 445

4.4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

การนำอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น มาประกอบกันเป็นชุดทดลองที่สามารถเก็บข้อมูลเพื่อบันทึกผลการศึกษา และนำผลดังกล่าวไปวิเคราะห์ได้

4.4.1 อุปกรณ์ชุดทดลอง

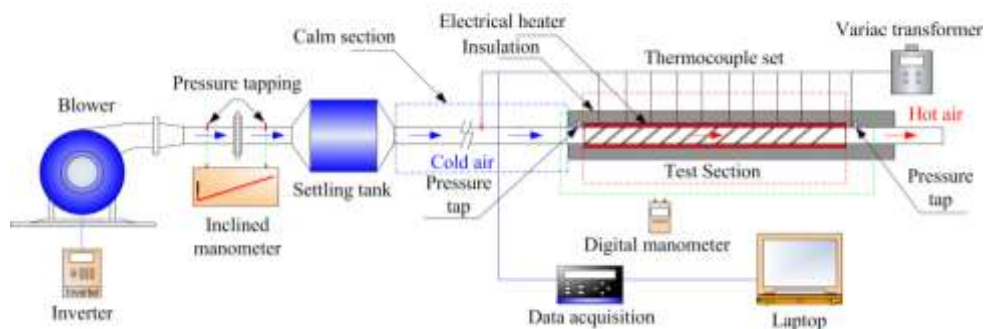
ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมที่มีการติดตั้งปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด และอุปกรณ์การทดลองต่าง ๆ ที่ประกอบชุดทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 อากาศ เป็นของไหลที่ใช้ทดสอบใน ส่วนของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน ได้ถูกส่งตรงเข้าสู่ระบบโดยพัดลมความดันสูง (high-pressure blower) ขนาด 1.45 W ซึ่งท่อกลมที่ใช้จะเชื่อมต่อระหว่างพัดลมกับถังพักลม (settling tank) โดยมีอินเวอร์เตอร์ คอยช่วยในการปรับความเร็วรอบการทำงานของพัดลมเพื่อให้ได้อัตราการไหลของอากาศ ตามที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้ อัตราการไหลของอากาศในระบบถูกวัดโดยใช้แผ่นออริฟิส ซึ่งจะถูกลบเทียบค่า มาก่อนโดยใช้ Hot wire และ Vane-type Anemometers (Testo 445) รวมไปถึงค่าความดันตกคร่อม ออริฟิส ได้ทำการวัดค่าดังกล่าวโดยใช้ม้านอนมิเตอร์แบบเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.14 แผนผังของชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

โครงสร้างของส่วนทดสอบนั้นเป็นท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50 มิลลิเมตร ความยาวในช่วงทดสอบ 2 เมตร มีการพันขดลวดฮีตเตอร์ เพื่อให้ได้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอในช่วงระยะเวลาที่ทำการทดสอบ ในส่วนของการวัดอุณหภูมิพื้นผิวส่วนทดสอบ ใช้อุปกรณ์เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสาย 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 56 ตัว (วัด 28 จุด) เพื่อวัดอุณหภูมิพื้นผิวของผนังท่อทดสอบทั้งด้านบน ด้านข้าง และด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.16 โดยเทอร์โมคัปเปิลจะถูกติดตั้งที่บริเวณรูจากด้านหลังในตำแหน่งกึ่งกลางของท่อ ตำแหน่งหัวต่อไม่เกิน 3 มิลลิเมตรจากผนังด้านใน และระยะห่างกันตามแนวแกน 50 มิลลิเมตร นอกจากนี้มีการใช้อุปกรณ์เทอร์โมคัปเปิลแบบ RTD Pt 100 จำนวน 2 ตัว ทำการติดตั้งที่ทางเข้าและทางออกเพื่อวัดอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของส่วนทดสอบ โดยสัญญาณความต่างศักย์จากเทอร์โมคัปเปิลจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องเก็บข้อมูล (recorder) และถูกบันทึกผลลงในคอมพิวเตอร์

จุดวัดความดันสถิตย์ 2 จุด อยู่ที่ด้านบนของท่อเพื่อวัดความดันตกคร่อมตามแนวแกนของส่วนทดสอบ ซึ่งจะใช้หาค่าตัวประกอบเสียดทาน โดยจุดที่วัดจะอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของท่อ จุดแรกตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรจากขอบทางเข้าส่วนทดสอบ และจุดที่สอง 50 มิลลิเมตรจากขอบทางออกส่วนทดสอบ การหาค่าความดันตกคร่อม ทำได้โดยใช้เครื่องวัดผลต่างความดันแบบดิจิตอลเชื่อมต่อจุดวัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (voltage regulator) เป็นแหล่งพลังงานของฮีตเตอร์แบบเส้นลวด ขนาด 1,000 วัตต์ มีรูปทรงเป็นหน้าตัดกลมขนาด 1.5 มิลลิเมตร พันรอบผิวท่อโดยมีระยะพิตซ์ของการพันขดลวดฮีตเตอร์ที่เท่ากัน พื้นผิวภายนอกชุดทดลองจะถูกหุ้มด้วยฉนวน ซึ่งใช้สำหรับให้ความร้อนแก่ส่วนทดสอบ เพื่อให้ได้ค่าฟลักซ์ความร้อนบริเวณพื้นผิวที่คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.4.2 อุปกรณ์ติดตั้งในชุดทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ทดลองมีลักษณะเป็นแผ่นอลูมิเนียมตรง โดยมีแผ่นครีบอกติดตั้งตามแนวยาวทำมุม 30 องศา ใช้สอดใส่ในท่อกลม เพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆของแผ่นครีบอก ที่มีอัตราการวางกันเท่ากับ 0.25 อัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 1.0 และมุมของช่องเปิดปิดเท่ากับ 30 45 60 และ 90 องศา



รูปที่ 4.15 อุปกรณ์ติดตั้งในชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.5 วิธีการทดลอง

1. ตรวจสอบเช็คชุดทดสอบให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทำการทดลอง โดยติดตั้งเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้ครบ
2. ติดตั้งปีกทดสอบเข้าไปภายในท่อตรงบริเวณที่เป็นส่วนของการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ
3. เปิดสวิทช์พัดลม (blower) เพื่อให้อากาศไหลผ่านชุดทดสอบ และปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้ความเร็วรอบการทำงานของพัดลม ตามอัตราการไหลของอากาศที่ได้ออกแบบไว้ โดยดูอัตราการไหลของอากาศในระบบ จากค่าความดันตกคร่อมที่ได้จากเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบแผ่นออริฟิสที่ถูกสอบเทียบค่ามาก่อน
4. วัดค่าความดันตกคร่อมส่วนทดสอบ ที่ความเร็วลมทั้ง 7 ระดับตามที่ออกแบบไว้ แล้วปรับค่าความเร็วลมที่ค่าแรกของการทดสอบ โดยความเร็วของอากาศจะอยู่ในช่วง 1.48 ถึง 6.57 เมตรต่อวินาที เพื่อให้ได้ช่วงของเลขเรย์โนลด์ตามที่ต้องการ
5. เปิดสะพานไฟ เพื่อทำการจ่ายไฟให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (voltage regulator) มีการปรับค่าความต่างศักย์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับโดยจ่ายไฟให้กับแผ่นฮีตเตอร์ เพื่อให้ความร้อนกับพื้นผิวท่อ ด้วยเงื่อนไขที่ว่า ค่าพลักซ์ความร้อนที่พื้นผิวคงที่
6. สังเกตอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 14 ตำแหน่ง คือ อุณหภูมิพื้นผิวของท่อในช่วงทดสอบ กับ อุณหภูมิทางเข้าและทางออกของอากาศ 2 ตำแหน่ง โดยรอให้อุณหภูมิคงที่ แล้วทำการบันทึกผลอุณหภูมิที่พื้นผิวในตำแหน่งต่าง ๆ
7. ปรับอินเวอร์เตอร์ โดยจะเพิ่มความเร็วลมตามค่าที่ออกแบบไว้ เพื่อให้ได้ค่าเลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง $Re = 4,760$ ถึง $21,092$ แล้วดำเนินการทดลองอีกครั้งตามขั้นตอน 4 – 6
8. เมื่อทดสอบชิ้นงานแรกครบแล้ว ให้ทำการเปลี่ยนมุมช่องปิดเปิด ตามที่กำหนดคือ 30 45 60 และ 90 องศา ติดตั้งในชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แล้วดำเนินการทดลองตามขั้นตอน 2 ถึง 7 ตามลำดับ เพื่อทำการบันทึกค่าความดันตกคร่อมส่วนทดสอบ อุณหภูมิพื้นผิวของส่วนทดสอบ รวมไปถึงอุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกส่วนทดสอบ
9. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าการถ่ายเทความร้อน โดยจะอยู่ในรูปของเลขนัสเซลท์ ส่วนค่าการสูญเสียความดัน จะอยู่ในรูปของตัวประกอบเสียดทาน และการหาค่าสมรรถนะความร้อน ซึ่งจะกล่าวถึงสมการการคำนวณในหัวข้อ 4.6 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เนื่องจากอาจมีความคลาดเคลื่อนของการวัดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จึงมีการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อน โดยความคลาดเคลื่อนในการคำนวณดังกล่าว ได้ทำการอ้างอิงจาก เอกสาร [31] มีการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด สำหรับพารามิเตอร์ร้อยละ $\pm 5\%$, เลขเรย์โนลด์ $\pm 5\%$ และเลขนัสเซลท์ $\pm 10\%$ ในส่วนของความเสียหาย มีการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดความเร็วในแนวแกนประมาณน้อยกว่า $\pm 7\%$, ความดันมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ $\pm 5\%$ และความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิบริเวณผนังช่องขนานประมาณ $\pm 0.5\%$

4.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

จุดมุ่งหมายของงานศึกษาวิจัยนี้ เพื่อหาการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานในพจน์ของเลขนัสเซลท์ โดยเลขเรย์โนลด์ สามารถเขียนได้เป็น

$$Re = UD/v \quad (4.1)$$

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

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

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

โดยที่

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

และ

$$\bar{T}_s = \frac{\sum T_s}{12} \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

พจน์ A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนแบบการพาของผนังด้านบนของช่องขนานที่ถูกให้ความร้อน เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยที่ได้จากอุณหภูมิผิวในแต่ละจุด (T_s) ตามแนวยาวของช่องขนาน T_i, T_o คือ อุณหภูมิทางเข้าและทางออกตามลำดับ โดยพจน์ \dot{m}, c_p, V และ I คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ตามลำดับ

เลขนัสเซิลท์เฉลี่ย (Nu) เขียนได้เป็น

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

ตัวประกอบเสียดทาน (f) หาได้จาก

$$f = \frac{2}{(LD)} \frac{\Delta P}{\rho U^2} \quad (4.7)$$

เมื่อ ΔP คือ ค่าความดันตกคร่อม, ρ คือ ความหนาแน่นของของไหลและ k คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศ คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศถูกกำหนดที่อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย (T_b) จากสมการ (4.7)

ที่สภาวะกำลังขับ (pumping power) เดียวกัน

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

เมื่อ \dot{V} อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศและเขียนในพจน์ตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ ได้เป็น

$$(f Re^3)_0 = (f Re^3)$$

$$Re_0 = Re(f/f_0)^{1/3} \quad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) คือ อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวทดสอบ (h) เทียบกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผนังเรียบ (h_0) ที่กำลังขับเดียวกัน

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

ซึ่งจะเป็นตัวชี้วัดที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยเมื่อให้ค่ามากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าท่อผนังเรียบ เมื่อใช้กำลังขับพัสดุของระบบ เท่ากัน โดยการพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่สูงที่สุด เป็นผลให้สามารถลดขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ป้อนให้กับระบบ ตลอดจนนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต เกิดประโยชน์ทั้งในแง่การลดพื้นที่การติดตั้งอุปกรณ์ ทั้งนี้ยังได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นด้วยราคาขายที่ต่ำลง ลดการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการช่วยเยียวยาและแก้ปัญหาวิกฤตทรัพยากรพลังงานที่เกิดขึ้น ณ ปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

การเพิ่มสมรรถนะความร้อนโดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่อง

แบบเปิดปิด

5.1 บทนำ

บทนี้เป็นบทที่ กล่าวถึงผลการทดลองส่วนที่ 1 เกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด ได้มีการศึกษาถึงอิทธิพลมุมปะทะการไหล จากการศึกษา ดังกล่าวสามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- (1.1) ทดสอบท่อผนังเรียบ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดันที่เข้ากับสหสัมพันธ์ที่เชื่อถือได้
- (1.2) ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดซึ่งมีความสูงคงที่ ต่อการถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อมในช่วงทดสอบ โดยศึกษาถึงมุมปะทะการไหล

มีการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในพจน์ของเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) และการสูญเสียความดันในพจน์ของตัวประกอบเสียดทาน (friction factor) จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันกับช่องขนานที่มีผนังเรียบ ในส่วนของตัวประกอบเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (thermal enhancement factor) ได้ใช้ข้อมูลในการคำนวณที่กำลังขับเดียวกัน ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.2 ผลการทดสอบท่อผนังเรียบ

การทดลองนี้ใช้ศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันของช่องขนานที่มีผนังเรียบในพจน์ของเลขนัสเซลท์ และตัวประกอบเสียดทาน ตามลำดับ ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และของ Blasius อ้างอิงเอกสาร [28, 29] ในช่วงการไหลปั่นป่วน

สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter

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

สำหรับการให้ความร้อน

สหสัมพันธ์ของ Blasius

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

$$3000 \leq \text{Re} \leq 20,000$$

5.2.1 เลขนัสเซลท์

ในรูปที่ 5.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ในกรณีท่อผนังเรียบ จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่าของเลขเรย์โนลด์ได้มีการเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ค่าเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซลท์แบบปกติกับค่าเลขนัสเซลท์จากสหสัมพันธ์ Dittus-Boelter จากการทดลองดังกล่าวพบว่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่าของเลขนัสเซลท์ จะมีค่าน้อยกว่าค่าของเลขนัสเซลท์ ที่ได้จากสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter โดยที่ค่าเลขนัสเซลท์ จากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมากกว่าคิดเป็น 6.38% เมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter โดยที่ค่าเลขนัสเซลท์จากสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter จะใช้ทำการหาค่าเลขนัสเซลท์ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลมผนังเรียบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ $\text{Re}_D \geq 10,000$

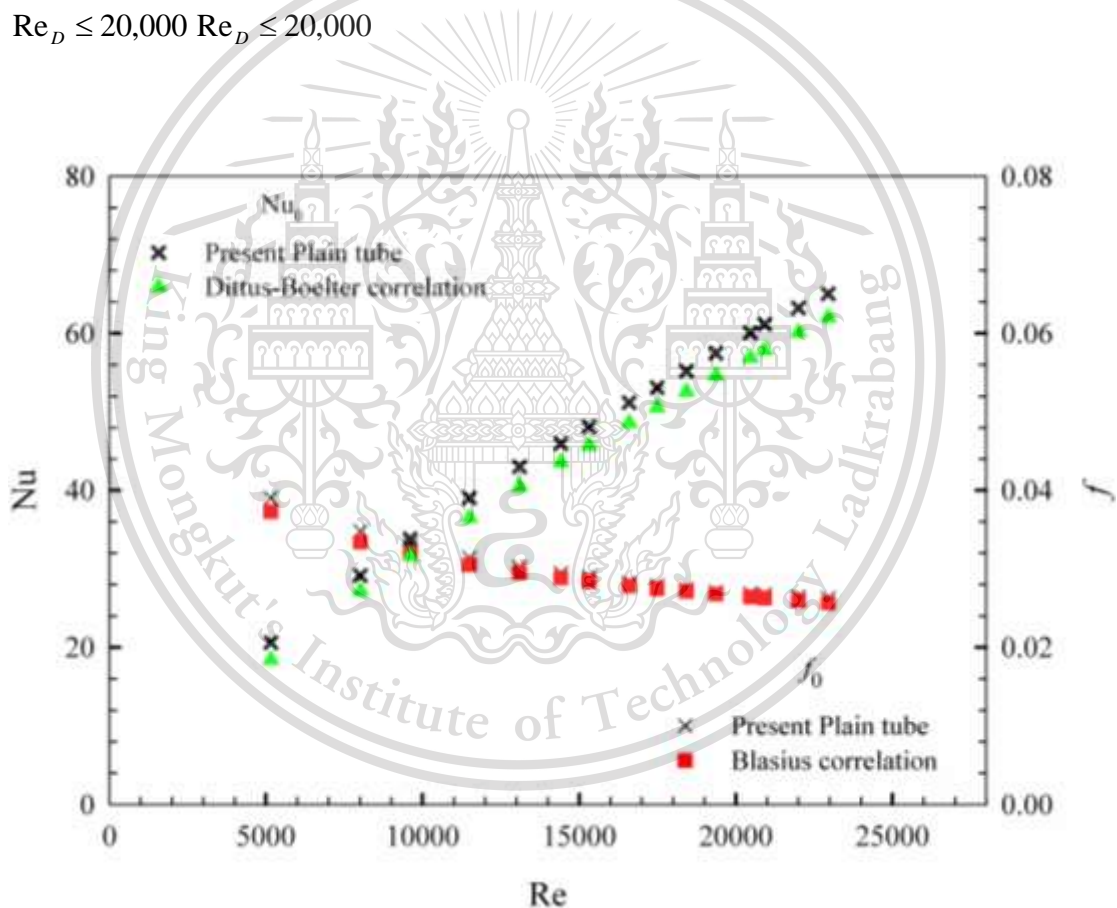
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.2.2 ตัวประกอบเสียดทาน

รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์กรณีท่อผนังเรียบ จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ค่าของตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อย เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น มีการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองกับค่าตัวประกอบเสียดทานจากสหสัมพันธ์ของ Blasius พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่าของตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าของตัวประกอบเสียดทานจากสหสัมพันธ์ของ Blasius โดยที่ค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.43% เมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Blasius โดยค่าตัวประกอบเสียดทานจากสหสัมพันธ์ของ Blasius จะใช้หาค่าตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลมผนังเรียบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์, $Re_D \leq 20,000$



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์

สำหรับท่อผนังเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

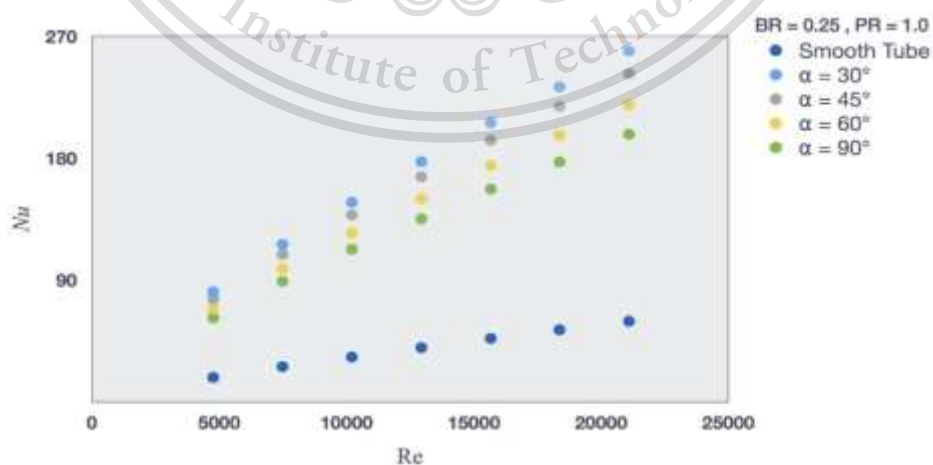
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการศึกษาทำให้ทราบผลการทดลองของท่อผนังเรียบ ที่ได้ทำการเปรียบเทียบกับ สหสัมพันธ์ที่น่าเชื่อถือและได้รับความนิยม โดยเลขนัสเซลท์จะเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 6.38% และตัวประกอบเสียดทานจะเปรียบเทียบกับ สหสัมพันธ์ของ Blasius ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 2.43% ดังนั้นถือได้ว่าผลการทดลองมีความ น่าเชื่อถือได้ โดยทั่วไปผลการทดลองสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่ ควรเกิน 10% ซึ่งถือว่าผลการทดลองในครั้งนี้มีค่าน่าเชื่อถือ

5.3 ผลการทดลองท่อติดตั้งปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด

5.3.1 อิทธิพลของมุมปะทะของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ

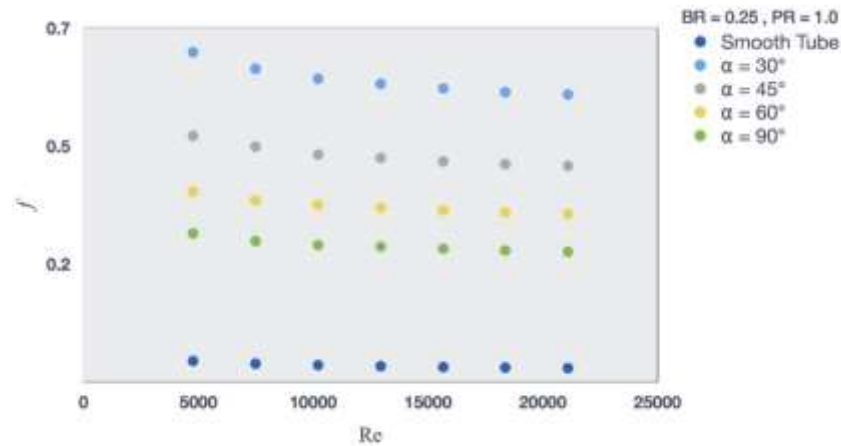
จากการศึกษาทำให้ได้ผลการทดลองของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำที่ มีมุมปะทะ 4 มุม คือ $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงให้เห็นถึงการ เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อที่มีการใส่ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิด ปิดตามลำดับ จากรูปที่ 5.2 พบว่า มุมปะทะ 30° ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมากกว่ามุมปะทะ $45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ เนื่องจากมุมปะทะจะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลทำงานถึงความรุนแรง ของความปั่นป่วนโดยมุมปะทะน้อยจะขัดขวางการไหลได้ดีกว่าทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า การเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานของกรณีการใส่ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด ที่มีมุม ช่องเปิดปิดเท่ากับ เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมุม ช่องเปิดปิดลดลง เนื่องจากมุมช่องเปิดปิดมีค่าน้อยลงทำให้เกิดการขัดขวางการไหลของของไหลมาก ขึ้นส่งผลถึงตัวประกอบเสียดทานดังแสดงในรูปที่ 5.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ชิ้นงานแบบคว่ำ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

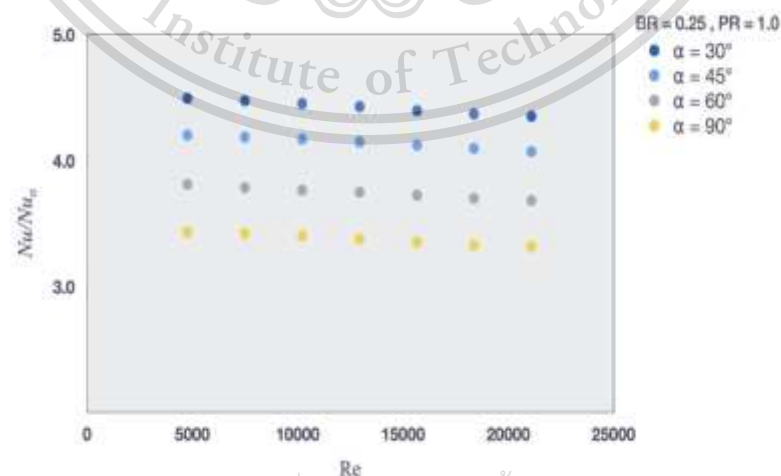


รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานสำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของ
ชิ้นงานแบบคว่ำ

5.3.2 สมรรถนะความร้อนของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ

อัตราส่วนของเลขนีสเซลท์, Nu/Nu_0 การหาอัตราส่วนเลขนีสเซลท์ของกรณีทดสอบกับเลขนีสเซลท์ของท่อผนังเรียบ สามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 อัตราส่วนเลขนีสเซลท์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น มุมช่องเปิดปิดที่ดีที่สุดคือมุม 30 องศา และ 45 60 90 องศา ตามลำดับ

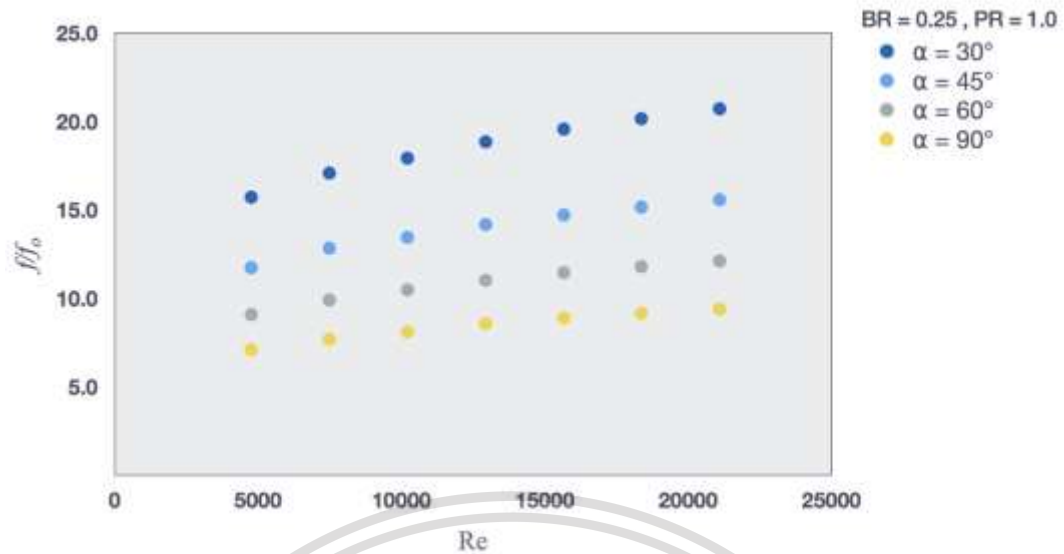
ทั้งนี้มีการกล่าวถึงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน, f/f_0 กับเลขเรย์โนลด์ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 พบว่า อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มของเลขเรย์โนลด์



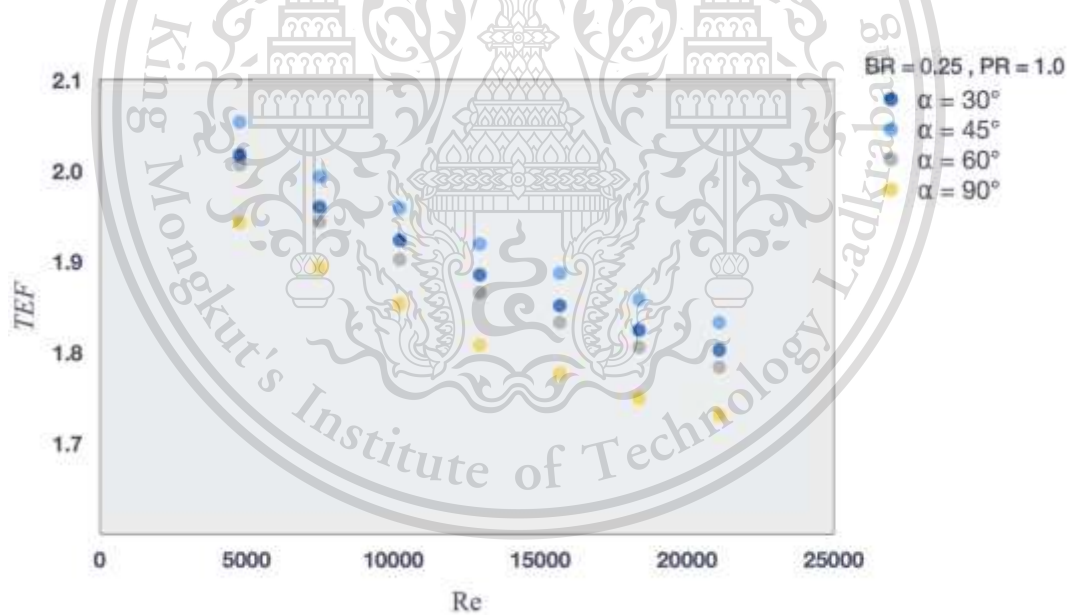
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเลขนีสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ที่แต่ละมุมปะทะ โดยเปรียบเทียบข้อมูลเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานที่กำลังขับเดียวกันจากการเปรียบเทียบดังกล่าวทำให้ทราบว่า สมรรถนะความร้อนค่าส่วนมากจะสูงที่เลขเรย์โนลด์ต่ำและลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเลขเรย์โนลด์ หรือสามารถกล่าวได้ว่า สมรรถนะความร้อนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเลขเรย์โนลด์ที่ทุกมุมปะทะของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ โดยสมรรถนะความร้อนของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ ซึ่งเลขเรย์โนลด์ที่ให้ค่าสมรรถนะความร้อนมากที่สุดคือ 4760 และมุมของช่องเปิดปิดคือ 45 องศา

การทดลองในส่วนดังกล่าวนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อ โดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องเปิดปิด โดยจากการทดลองพบว่า เลขเรย์โนลด์สูงขึ้นไปจะทำให้สมรรถนะลดลง เพราะทำให้เกิดความเสียดทานสูงขึ้นในขณะที่ให้เลขเรย์โนลด์ไม่ได้เพิ่มขึ้นมาก และมุมช่องเปิดปิดยิ่งมากยิ่งทำให้ค่าสมรรถนะความร้อนลดลง แต่มุมที่น้อยที่สุดไม่ได้ให้ค่าสมรรถนะที่มากที่สุด ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ 45 องศา ให้ค่าสมรรถนะ 2.05 และจากการทดลองหลังจากนี้ ควรมีการประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงกว่า เพื่อช่วยลดขนาดของอุปกรณ์การแลกเปลี่ยนความร้อน โดยค่าสมรรถนะความร้อนสูงสุดสำหรับทุกกรณี ที่ทำการทดสอบนี้พบที่เลขเรย์โนลด์ค่าต่ำสุด

5.3.3 อิทธิพลของมุมปะทะของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบหงาย

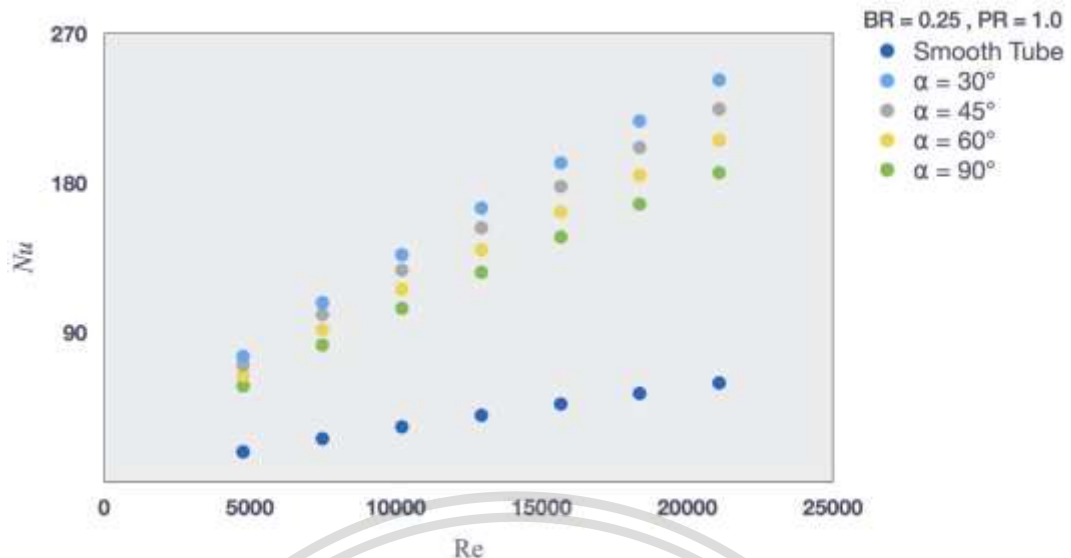
จากการศึกษาทำให้ได้ผลการทดลองของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบหงายที่มีมุมปะทะ 4 มุม คือ $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และ 5.8 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อที่มี การใส่สี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดตามลำดับ จากรูปที่ 5.7 เนื่องจากมุมปะทะจะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลทำงานถึงความรุนแรงของความปั่นป่วนโดยมุมปะทะน้อยจะขัดขวางการไหลได้ดีกว่าทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า

จากรูปที่ 5.8 ค่าตัวประกอบเสียดทานของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบหงาย ที่มีมุมปะทะ 30° จะมีค่ามากกว่ามุมปะทะต่าง ๆ การเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานของกรณีการใส่ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด ที่มีมุมช่องเปิดปิดเท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมช่องเปิดปิดลดลง เนื่องจากมุมช่องเปิดปิดมีค่าน้อยลงทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย การค้า
ไม่ว่ากรณีใดให้เกิดการขัดขวางการไหลของของไหลมากขึ้นส่งผลถึงตัวประกอบเสียดทาน

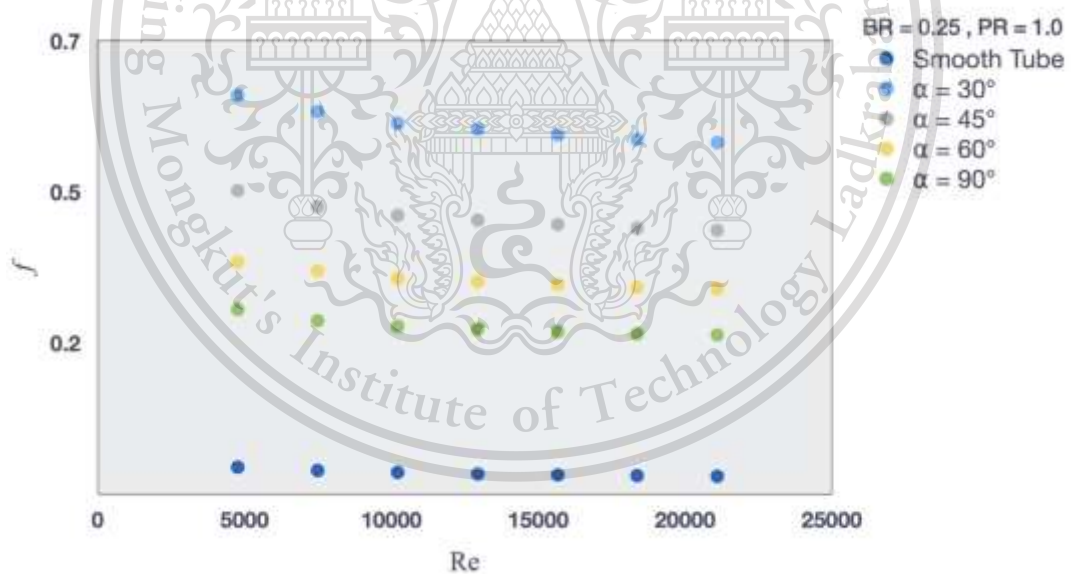
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของ

ชิ้นงานแบบหางาย



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานสำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของ

ชิ้นงานแบบหางาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

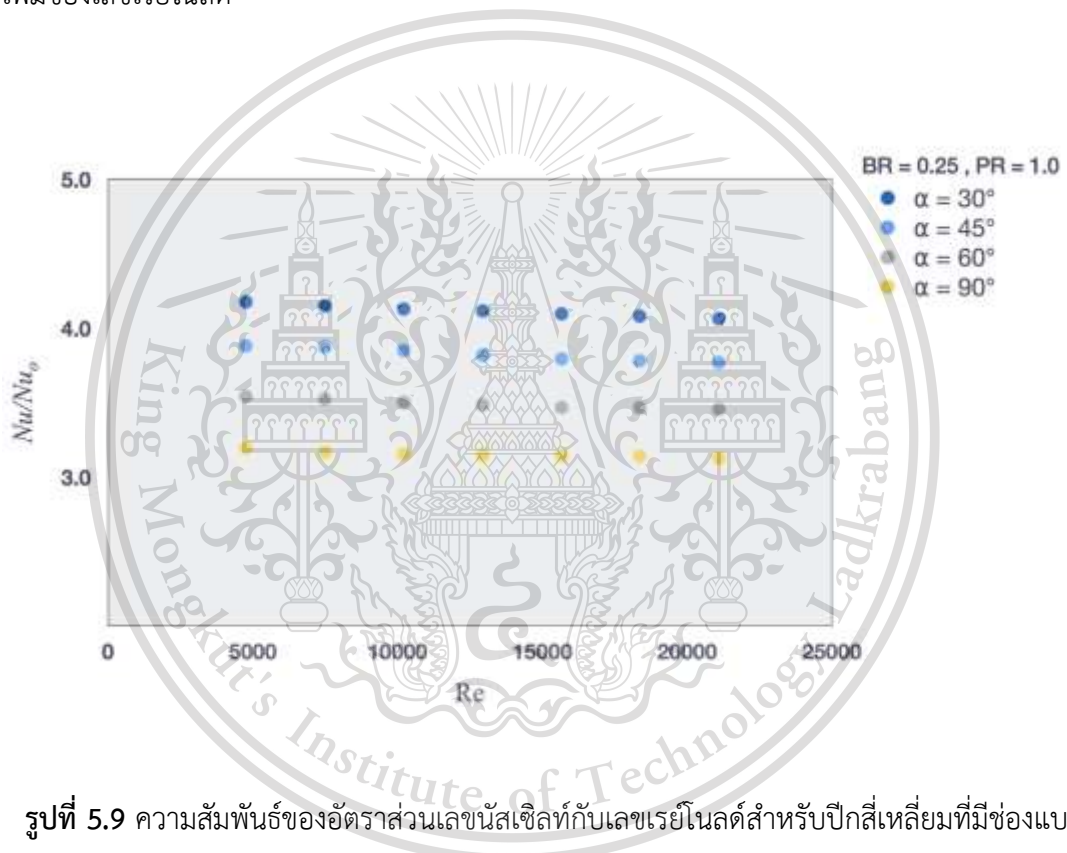
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.3.4 สมรรถนะความร้อนของปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบหงาย

อัตราส่วนของเลขนัสเซลท์, Nu/Nu_0 การหาอัตราส่วนของเลขนัสเซลท์ของกรณีทดสอบกับเลขนัสเซลท์ของท่อผนังเรียบ สามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 อัตราส่วนของเลขนัสเซลท์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น มุมช่องเปิดปิดที่ดีที่สุดคือมุม 30 องศา และ 45 60 90 องศา ตามลำดับ

ทั้งนี้มีการกล่าวถึงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน, f/f_0 กับเลขเรย์โนลด์ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 พบว่า อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มของเลขเรย์โนลด์

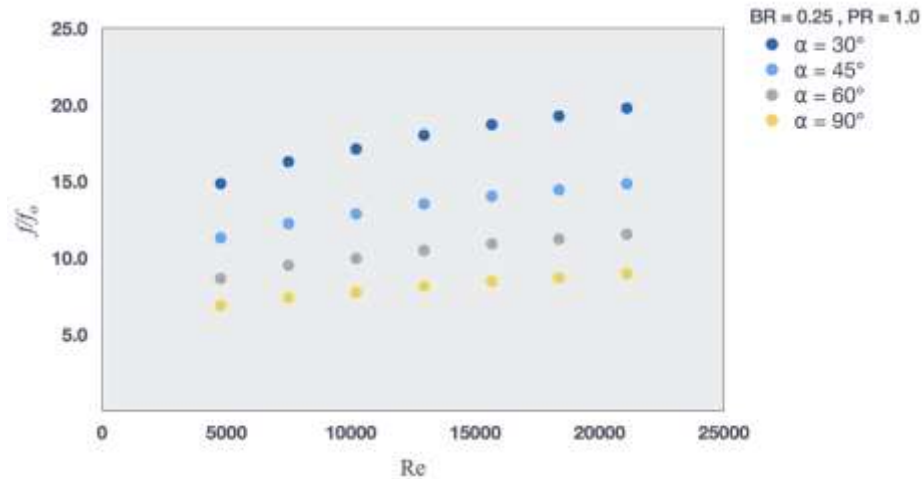


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบหงาย

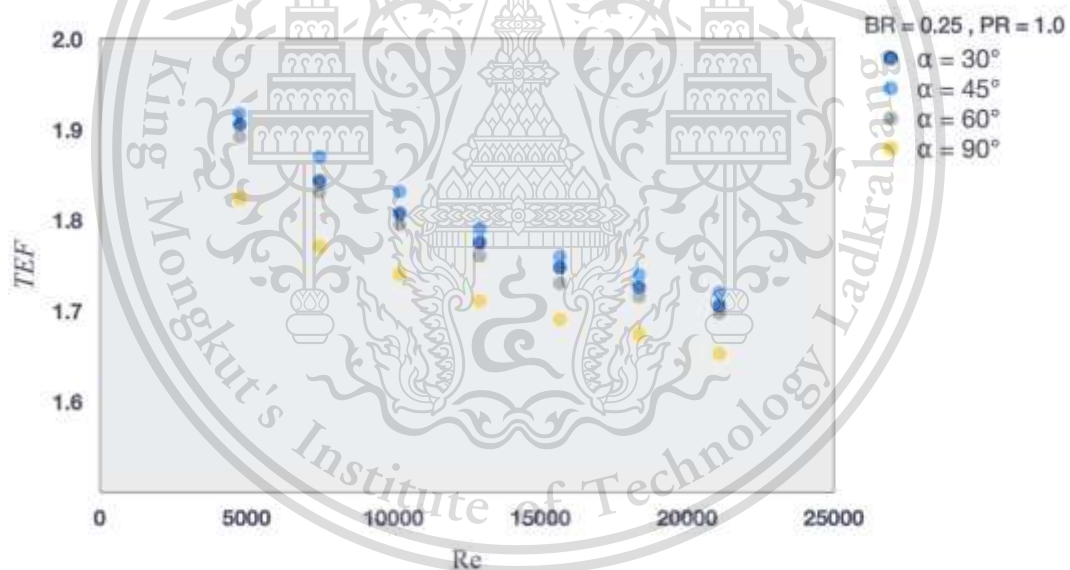
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบหงาย



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ของสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สำหรับปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบหงาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในรูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสมรรถนะความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ที่แต่ละมุมปะทะ โดยเปรียบเทียบข้อมูลเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานที่กำลังขับเคลื่อนจากการเปรียบเทียบดังกล่าวทำให้ทราบว่า สมรรถนะความร้อนค่าส่วนมากจะสูงที่เลขเรย์โนลด์ต่ำและลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเลขเรย์โนลด์ หรือสามารถกล่าวได้ว่า สมรรถนะความร้อนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเลขเรย์โนลด์ที่ทุกมุมปะทะของสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ โดยสมรรถนะความร้อนของสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดของชิ้นงานแบบคว่ำ ซึ่งเลขเรย์โนลด์ที่ให้ค่าสมรรถนะความร้อนมากที่สุดคือ 4760 และมุมของช่องเปิดปิดคือ 45 องศา

การทดลองในส่วนดังกล่าวนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อ โดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องเปิดปิด โดยจากการทดลองพบว่า เลขเรย์โนลด์สูงขึ้นไปจะทำให้สมรรถนะลดลง เพราะทำให้เกิดความเสียดทานสูงขึ้นในขณะที่ให้เลขนัสเซิลท์ไม่ได้เพิ่มขึ้นมาก และมุมช่องเปิดปิดยิ่งยิ่งทำให้ค่าสมรรถนะความร้อนลดลง แต่มุมที่น้อยที่สุดไม่ได้ให้ค่าสมรรถนะที่มากที่สุด ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ 45 องศา ให้ค่าสมรรถนะ 1.917 และจากการทดลองหลังจากนี้ควรมีการประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงกว่า เพื่อช่วยลดขนาดของอุปกรณ์การแลกเปลี่ยนความร้อน โดยค่าสมรรถนะความร้อนสูงสุดสำหรับทุกกรณีที่ทำกรทดลองนี้พบที่เลขเรย์โนลด์ค่าต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และ
ตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน กรณีสำหรับสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิด

แบบ	มุม ปะทะ	\overline{Nu}/Nu_0 \overline{Nu}/Nu_0	\overline{f}/f_0 \overline{f}/f_0	TEF
สี่เหลี่ยมที่มีช่อง แบบเปิดปิดสำหรับ ชิ้นงานแบบคว่ำ	30	4.49	15.7	2.01
	45	4.20	11.7	2.05
	60	3.81	9.06	2.00
	90	3.43	7.07	1.94
สี่เหลี่ยมที่มีช่อง แบบเปิดปิดสำหรับ ชิ้นงานแบบหงาย	30	4.17	4.97	1.90
	45	3.88	6.45	1.91
	60	3.54	7.51	1.89
	90	3.19	12.17	1.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.4 สรุป

ในที่นี้กล่าวถึงผลการทดลองในส่วนที่ 1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้สื่ไหลที่มีช่องแบบเปิดปิดสำหรับชิ้นงานแบบคว่ำและแบบหงาย มีการศึกษาถึงอิทธิพลของมุมปะทะ

ผลการทดลองท่อผนังเรียบ ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และของ Blasius อ้างอิงในเอกสาร [28, 29] ในช่วงของการไหลปั่นป่วน

สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter,

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

โดยค่าเลขนีสเซิลท์จากการทดลองมีค่ามากกว่าสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ให้ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 6.38 %

สหสัมพันธ์ของ Blasius,

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

โดยค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองมีค่ามากกว่าสหสัมพันธ์ของ Blasius ให้ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.43 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการทดลองท่อที่ติดตั้งปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดสำหรับชิ้นงานแบบคว่ำ

การทดลองในส่วนนี้เพื่อทำการศึกษากายภาพความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อ โดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดมุมปะทะต่าง ๆ พบว่า การใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดมุมปะทะต่างกันจะทำให้การสูญเสียความดันเพิ่มขึ้นค่อนข้างสูง ที่มุม 45 องศา และให้อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนค่าสูงมากเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผนังเรียบด้วย, $Nu/Nu_0 = 4.07-4.20$ โดยขึ้นอยู่กับมุมช่องเปิดปิดและเลขเรย์โนลด์ต่ำ ๆ ในส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเกือบจะคงที่ จากการทดลองดังกล่าว พบว่าที่ มุม 45 องศา ควรนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพการใช้งานที่สูงกว่า ทั้งนี้เพื่อช่วยลดขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในค่าสมรรถนะความร้อนสูงสุดสำหรับทุกกรณีทดสอบนี้พบที่เลขเรย์โนลด์ค่าต่ำสุด

ผลการทดลองท่อที่ติดตั้งปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดสำหรับชิ้นงานแบบหงาย

การทดลองในส่วนนี้เพื่อทำการศึกษากายภาพความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อ โดยใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดมุมปะทะต่าง ๆ พบว่า การใช้ปีกสี่เหลี่ยมที่มีช่องแบบเปิดปิดมุมปะทะต่างกันจะทำให้การสูญเสียความดันเพิ่มขึ้นค่อนข้างสูง ที่มุม 45 องศา และให้อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนค่าสูงมากเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผนังเรียบด้วย, $Nu/Nu_0 = -3.77$ โดยขึ้นอยู่กับมุมช่องเปิดปิดและเลขเรย์โนลด์ต่ำ ๆ ในส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเกือบจะคงที่ จากการทดลองดังกล่าว พบว่าที่ มุม 45 องศา ควรนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพการใช้งานที่สูงกว่า ทั้งนี้เพื่อช่วยลดขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในค่าสมรรถนะความร้อนสูงสุดสำหรับทุกกรณีทดสอบนี้พบที่เลขเรย์โนลด์ค่าต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Moradi, R. and Arani, A. (2019). Shell and tube heat exchanger optimization using new baffle and Tube configuration, *Applied Thermal Engineering*, vol. 157, July 2019, pp. 113736.
- [2] Promvonge, P. and Skullong, S. (2020). Thermo-hydraulic performance in heat exchanger tube with V-shaped winglet vortex generator, *Applied Thermal Engineering*, vol. 164, January 2020, pp. 114424
- [3] Liu, H.L. Li, H. He, Y.L. and Chen, Z.T. (2018). Heat transfer and flow characteristics in a circular tube fitted with rectangular winglet vortex generators, *Applied Thermal Engineering*, vol. 126, November 2018, pp. 989 - 1006.
- [4] Zheng, N. Yan, F. Zhang, K. Zhou, T. and Sun, Z. (2020). A review on single-phase convective heat transfer enhancement based on multi-longitudinal vortices in heat exchanger tubes, *Applied Thermal Engineering*, vol. 164, January 2020, pp. 114475.
- [5] Zheng, N. and Sun, Z. (2020). Investigations of the turbulent thermal-hydraulic performance in circular heat exchanger tubes with multiple rectangular winglet vortex generators, *Applied Thermal Engineering*, vol. 168, March 2020, pp. 114838.
- [6] Nakhchi, M.E. Hatami, M. and Rahmati, M. (2020). Experimental investigation of heat transfer enhancement of a heat exchanger tube equipped with double-cut twisted tapes, *Applied Thermal Engineering*, vol. 180, November 2020, pp. 115863.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [7] Promvong, P. and Skullong, S. (2020). Augmented heat transfer in tubular heat exchanger fitted with V-baffled tapes, *Applied Thermal Engineering*, vol. 155, September 2020, pp. 106429
- [8] Cheng, L. and Du, T. (2019). Performance of continuous helical baffled heat exchanger with varying elliptical tube layouts, *Applied Thermal Engineering*, vol. 133, April 2019, pp. 1165-1175.
- [9] Nakhchi, M.E. and Esfahani, J.A. (2020). Numerical investigation of heat transfer enhancement Inside Heat exchanger tubes fitted with perforated hollow cylinders, *Applied Thermal Engineering*, vol. 147, January 2020, pp. 114424.
- [10] Menni, Y. and Ameer, H. (2019). Laminar cooling of shear thinning fluids in horizontal and baffled tubes: Effect of perforation in baffles, *Applied Thermal Engineering*, vol. 14, December 2019, pp. 1004
- [11] Skullong, S. Promvong, P. Thianpong, C. and Jayranaiwachira N. (2017). Thermal behaviors in a round tube equipped with quadruple perforated-delta-winglet pairs, *Applied Thermal Engineering*, vol. 115, March 2017, pp. 229-243
- [12] Mun, L. and Jinlong, X. (2020). Flow and heat transfer performances of directly printed curved-rectangular vortex generators in compact fin-tube heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, vol. 180, November 2020, pp. 115830.
- [13] Promvong, P. and Skullong, S. (2020). Experimental and numerical heat transfer study of turbulent Tube flow through discrete V-winglets, *Applied Thermal Engineering*, vol. 151, April 2020, pp. 119351

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

[14] Modi, A.J. Kalel, N.A. and Rathod, M.K. (2020). Experimental and numerical heat transfer study of turbulent Tube flow through discrete V-winglets, *Applied Thermal Engineering*, vol. 158, September2020, pp. 119724

[15] นรินทร์ กุลนภาตล, ภัทรพันธุ์ ทองยศ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์ (2557). การเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแผ่นกั้นรูปตัวยู, การประชุมวิชาการเครื่องสำอางวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, 28, ตุลาคม 2557.

[16] นำโชค ศรีสารคาม, ชนนทีป์ หวังวิบูลย์กิจ และ ธนาบุรุษย์ ตะรงค์ (2561). การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยปีก, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[17] ปาณัสม์ วิวัฒน์ธนสาร และ อภิสิตธิ์ ชูชานวนา (2561). การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมโดยการใส่แผ่นครีบบีคคู่, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[18] ฉันทชนก สุพธานนท์กุล, พิซชากร ลอระพงษ์ และ ธัญญรัตน์ สุขสน (2559). การศึกษาพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมที่มีการกุดขึ้นรูปครีบบีคคู่, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.