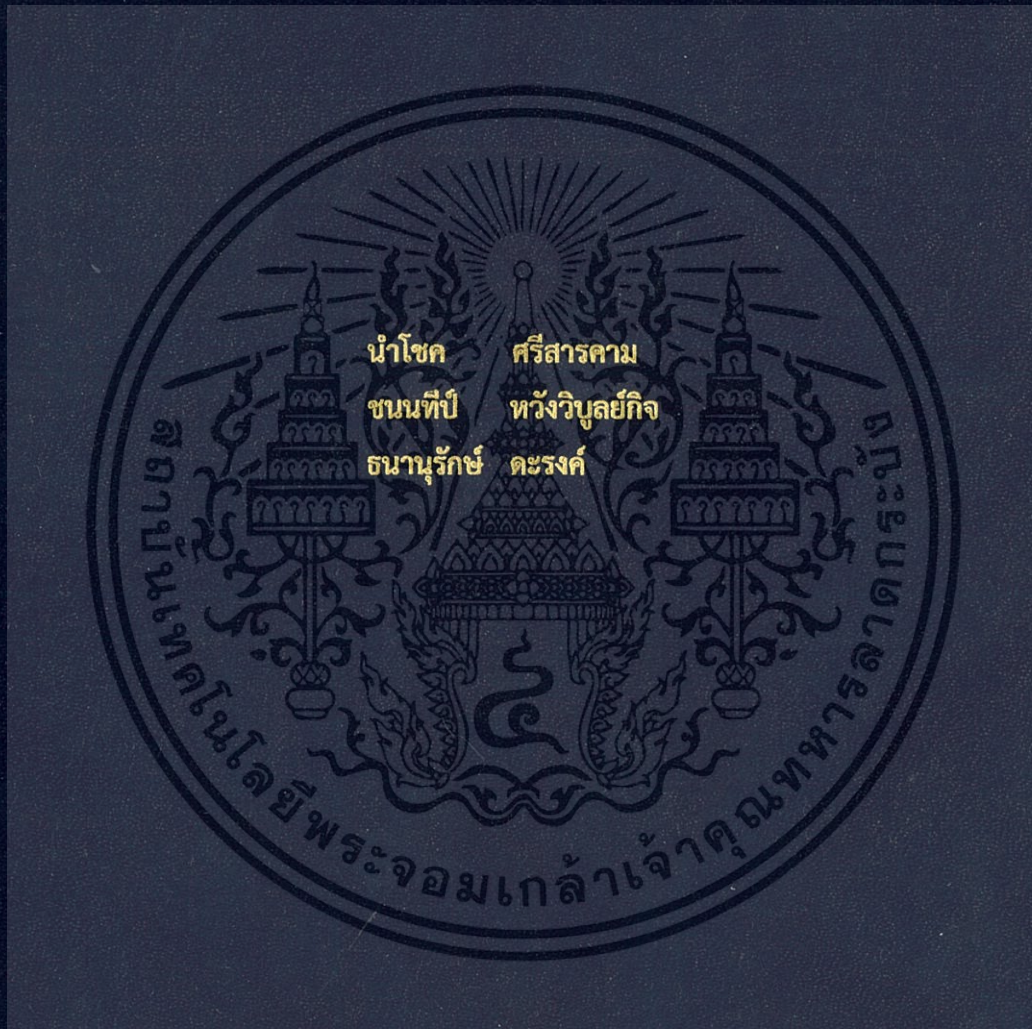


การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยปีก

Heat Transfer Enhancement in a Square Duct with Winglets



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยปีก

Heat Transfer Enhancement in a Square Duct with Winglets



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Heat Transfer Enhancement in a Square Duct with Winglet



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

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยปีก

Heat Transfer Enhancement in a Square Duct with Winglets

ผู้จัดทำ

1. นายนำโชค ศรีสารคาม รหัสประจำตัว 58010675
2. นายชนนทีป์ หวังวิบูลย์กิจ รหัสประจำตัว 58010231
3. นายธนากรักษ์ ตะรงค์ รหัสประจำตัว 58010547



(รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยปีก

นายนำโชค ศรีสารคาม รหัสประจำตัว 58010675
นายชนนทีป์ หวังวิบูลย์กิจ รหัสประจำตัว 58010231
นายธนาณูรักษ์ ดะรงค์ รหัสประจำตัว 58010547
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องถ่ายเทความร้อน จึงนำแนวคิดในการประยุกต์ปีกตัววีรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าติดตั้งที่ผนังด้านบนกับผนังด้านล่างของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อเพิ่มสมรรถนะความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยพิจารณารูปทรง, มุมปะทะ, ความสูงและ ระยะพิทช์ปีก ซึ่งส่งผลต่อลักษณะการไหลของของไหล การสูญเสียความดันและแรงเสียดทานเพื่อควบคุม กลไกการไหลในท่อ การทดลองจะสอดแผ่นบางติดปีกภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส แบบความสูงสม่ำเสมอ อัตราส่วนความสูงปีกต่อความสูงท่อ 3 แบบ, ปีกแบบความสูงสม่ำเสมอ 3 แบบ คือ ความสูง (b/D_n) $BR = 0.1, 0.15, 0.2$ อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงช่องขนานคงที่ (P/D_n), $PR = 1.0, 1.5$ และ 2.0 ความหนา, $t = 0.8$ มิลลิเมตร การทดลองที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของไหล ระหว่าง $4,000 - 29,000$ ของไหล ที่ใช้คือ อากาศในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์เพื่อให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลและ ผนังท่อภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ และในอีกรูปแบบเราได้ทำปีกรูปแบบ เดียวกันแต่ได้ทำการวางไม่ชิดผิวเป็นการวางกึ่งกลางท่อทำที่ $PR=1.0$ และ $BR=0.1, 0.15$ และ 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Heat Transfer Enhancement in a Square Duct with Winglets

Numchoke	Srisarakham	58010675
Chanontee	Wangwibulkit	58010231
Tananuruk	Darong	58010547
Asoc.Prof.Dr.Pongjet	Promvonge	Advisor

Year 2018

ABSTRACT

This research present a study on heat transfer enhancement in a square duct with V-shaped winglet on both upper and lower panels of duct for thermal performance of heat exchangers enhancing. The experiments are carried out by varying airflow rate for Reynolds number ranging from 4,000 – 29,000 passing through the constant surface heat flux wall. The V-shaped winglets which are on upper and lower parts of the tested duct in inline arrangement with the attack angle of 30°. The effects of height blockage (BR) of 0.1, 0.15 and 0.2 and three pitch to duct height ratios (PR) of 1.0, 1.5 and 2.0. The experiment results showed that the V-shaped winglets with Br=0.2, PR=1.0 provided the highest Nusselt number (Nu) and friction factor while the V-shaped winglet with BR=0.1 and PR=1.0 presented the highest thermal enhancement factor and another form of arrangement at the central of duct is tested for delta and rectangular winglets at PR=1.0 and BR=0.1, 0.15 and 0.2.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา มา ณ ที่นี้อย่างสูง ในการให้ความรู้ คำแนะนำความช่วยเหลือ ดูแลเอาใจใส่อย่างดี การอบรมสั่งสอนที่มีคุณค่าและประโยชน์แก่ผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณครอบครัวของคณะผู้จัดทำทุกท่านที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในทุกด้าน

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์เพื่อการศึกษา



นายนำโชค ศรีสารคาม

นายชนนทีป์ หวังวิบูลย์กิจ

นายธนากรักษ์ ดะรงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 โครงร่างวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย.....	19
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	20
3.1 บทนำ.....	20
3.2 กลศาสตร์ของไหล.....	20
3.2.1 สภาวะการไหล.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.2 การเปลี่ยนความดันและตัวประกอบ เสียดทาน ในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่.....	22
3.2.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่.....	23
3.2.4 ความเร็วเฉลี่ย.....	25
3.3 การสมดุลของพลังงาน.....	26
3.4 การถ่ายเทความร้อน.....	27
3.4.1 อุณหภูมิเฉลี่ย.....	29
3.5 สหสัมพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบราบเรียบในท่อกลม.....	29
3.6 สหสัมพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม.....	31
3.7 สหสัมพันธ์การพาความร้อน สำหรับท่อที่ไม่กลม.....	32
3.8 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน.....	33
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	34
4.1 บทนำ.....	34
4.2 การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลอง.....	34
4.3 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง.....	36
4.4 อุปกรณ์การทดลอง.....	40
4.5 วิธีการทดลอง.....	42
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	43
5.1 บทนำ.....	43
5.2 ผลการทดสอบท่อผนังเรียบ.....	43
5.3 การทดลองโดยศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความสูงของปีกที่แตกต่างกัน.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.4 การทดลองโดยศึกษาอิพลของระยะพิตซ์ที่แตกต่างกัน.....	52
5.5 การทดลองโดยศึกษาอิพลของอัตราส่วนความสูงของ ปีกที่แตกต่างกันและลักษณะของปีกที่มีรูปแบบแตกต่างกัน.....	57
5.6 อภิปรายผลการทดลอง.....	60
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	67
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	67
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างปีก.....	4
รูปที่ 2.2 รูปแบบปีกภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Ahn [7]	7
รูปที่ 2.3 รูปแบบปีกภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Karwa [9]	8
รูปที่ 2.4 รูปแบบปีกภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Tanda [10]	9
รูปที่ 2.5 รูปแบบปีกของ Bopche และ Tandale [11]	9
รูปที่ 2.6 ชุดทดสอบของ Chompookham et al. [12] (a) ชุดทดสอบ (b) รูปปีกเล็กและปีกรูปลิ้ม.....	10
รูปที่ 2.7 รูปปีกตัววีทำมุม 60° ของ Promvongse [13]	11
รูปที่ 2.8 รูปปีกตัวดับเบิลยูทำมุม 30°-75° ของ Lanjewar et al. [14].....	11
รูปที่ 2.9 รูปการจัดวางปีกชุดทดสอบของ Tamna et al. [17], (a) วางแนวเดียวกัน, (b) วางแนวเอียงกัน, และ (c) วางปีกที่แผ่นบนอย่างเดียว.....	12
รูปที่ 2.10 รูปการจัดวางปีกชุดทดสอบของ Skullong et al. [18], (a) วางแนวเดียวกัน และ (b) วางแนวเอียงกัน.....	13
รูปที่ 2.11 รูปปีกชุดทดสอบของ Alam et al. [19]	13
รูปที่ 2.12 โครงสร้างช่องขนานและโดเมนการคำนวณเชิงตัวเลขของ Sripattanapipat [20].....	14
รูปที่ 2.13 การจัดวางปีกในแบบตรงกันและเอียงกันของ บูรณ์โชคไพศาล [21].....	15
รูปที่ 2.14 รูปแบบปีกภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Hyun Lee and Rhee [23].....	16
รูปที่ 2.15 ปีกรูปตัวยูของ สุขเดียม[24].....	17
รูปที่ 2.16 แผ่นทดสอบของ ชมภูคำ[25].....	18
รูปที่ 3.1 การก่อตัวของชั้นขอบเขตการไหลของการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม [35].....	21
รูปที่ 3.2 สมดุลแรงบนอิเลเมนต์ดิฟเฟอเรนเชียล สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ก่อตัวเต็มที่ในท่อกลม[35].....	23
รูปที่ 3.3 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ [35].....	26
รูปที่ 3.4 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่ในท่อกลม [35].....	28
รูปที่ 3.5 การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม [35].....	28
รูปที่ 3.6 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการติดแผ่นติดปีกรูปตัววีด้านบนและด้านล่าง.....	33
รูปที่ 4.1 ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเหลี่ยม.....	36
รูปที่ 4.2 แหล่งจ่ายอากาศ.....	37
รูปที่ 4.3 อินเวอร์เตอร์ (Inverter) รุ่น ND 1 Series.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ.....	38
รูปที่ 4.5 ถังพักลม(Setting tank)	38
รูปที่ 4.6 อุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิ.....	39
รูปที่ 4.7 เครื่องวัดความดันตกคร่อม.....	39
รูปที่ 4.8 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ.....	40
รูปที่ 4.9 ปีกรูปตัววีแบบติดผนังท่อ.....	41
รูปที่ 4.10 ปีกรูปตัววีแบบไม่ติดผนังท่อ.....	41
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลที่ในการแสดงอิทธิพล BR.....	46
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลที่ในการแสดงอิทธิพล BR.....	46
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลที่ในการแสดงอิทธิพล BR.....	47
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลที่ในการแสดงอิทธิพล BR.....	47
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR.....	48
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR.....	48
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR.....	49
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR.....	49
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพล BR.....	50
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพล BR.....	50
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพล BR.....	51
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพล BR.....	51
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลที่ในการแสดงอิทธิพล BR.....	52
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลที่ในการ แสดงอิทธิพลPR.....	53
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลที่ในการ แสดงอิทธิพล PR.....	53
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล PR.....	54
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล PR.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล PR.....	55
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในการแสดงอิทธิพล PR.....	55
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในการแสดงอิทธิพล PR.....	56
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในการแสดงอิทธิพล PR.....	56
รูปที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ กับเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพล BR และลักษณะปีก.....	57
รูปที่ 5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR และลักษณะปีก.....	58
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในการแสดงอิทธิพล BR และลักษณะปีก.....	58
รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ กับเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพล BR และลักษณะปีก.....	59
รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับ ตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR และลักษณะปีก.....	59
รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในการแสดงอิทธิพล BR และลักษณะปีก.....	60
รูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับ อัตราส่วนเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพล BR.....	61
รูปที่ 5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับอัตรา ส่วนเลขประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพลBR.....	62
รูปที่ 5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ กับค่าตัวประกอบเพิ่มขึ้นทางความร้อนแสดงอิทธิพล BR.....	63
รูปที่ 5.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ กับเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพล BR.....	64
รูปที่ 5.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์ กับเลขประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 5.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์

กับค่าตัวประกอบเพิ่มขึ้นทางความร้อนแสดงอิทธิพล BR.....66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_C	พื้นที่หน้าตัด , m^2
A_S	พื้นที่ผิว , m^2
C_f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
C_p	ความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่ , $J/kg \cdot K$
C_V	ความร้อนจำเพาะของของไหลที่ปริมาตรคงที่ , $J/kg \cdot K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ , m
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก , m
f	ตัวประกอบแรงเสียดทาน
f_0	ตัวประกอบแรงเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน , $W/m^2 \cdot K$
k	ค่าการนำความร้อน , $W/m^2 \cdot K$
L	ความยาวท่อ , m
\dot{m}	อัตราการไหลของของไหล , kg/s
Nu_D	นัสเซลท์นัมเบอร์
Nu_o	นัสเซลท์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบ
Pr	พลาตันนัมเบอร์
p	ระยะพิตช์
Δp	ความดันลดของของไหล , N/m^2
Q	อัตราการไหลของของไหล , m^3/s
q_{conv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด , W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

q''_s	ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวน้ำ , W/m^2
R	ค่าคงที่ของก๊าซ , $J/kg \cdot K$
Re_D	เรย์โนลด์นัมเบอร์
r_0	รัศมีท่อกลม , m
T	อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ , $^{\circ}C$
T_b	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล , $^{\circ}C$
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ , $^{\circ}C$
$T_{m,j}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อทางเข้า , $^{\circ}C$
$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อทางออก , $^{\circ}C$
T_s	อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวครีป , $^{\circ}C$
u	ความเร็วตามแนวแกน x , m/s
u_m	ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ , m/s
\bar{V}	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล , m/s
v	ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน , m/s
ρ	ความหนาแน่นของของไหล , kg/m^3
μ	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล , $N \cdot s/m^2$
μ_s	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหลที่ผิว , $N \cdot s/m^2$
τ_r	ความเค้นเฉือนในแนวรัศมี , N/m^2
τ_s	ความเค้นเฉือนบนผิว , N/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีเพิ่มขึ้นมาก ทำให้มีความต้องการพลังงานเพื่อใช้งานในปริมาณมากขึ้น ในอุตสาหกรรมได้พัฒนาศักยภาพทั้งในด้านเทคโนโลยีการผลิต ชิ้นส่วน อุปกรณ์ต่าง ๆ โดยหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนทั่วโลกได้คำนึงถึงความสำคัญในการประหยัดและใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า อย่างไรก็ตามความต้องการในการใช้พลังงานยังมีมากขึ้น อันเนื่องจากการแข่งขันทางธุรกิจ และจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม วิกฤตราคาเชื้อเพลิง ทั้งทางตรงและทางอ้อมได้แก่ มลพิษ ภาวะโลกร้อน ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม วิกฤตราคาเชื้อเพลิง และวิกฤตเศรษฐกิจ เป็นต้น ดังนั้นหากขาดการใช้องค์ความรู้พื้นฐานที่เหมาะสมสู่การพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ก็จะทำให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและสังคมมากยิ่งขึ้น

ปัจจุบันนี้การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นในด้านอุตสาหกรรม ตั้งแต่โรงงานขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ ในทางอุตสาหกรรมได้มีการนำเอาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ในหลายระบบภายในอุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีการแข่งขันและพัฒนาสินค้ามากยิ่งขึ้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงต้องมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย เทคโนโลยีการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจึงสำคัญมากต่อการออกแบบและประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น เตาเผา เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หม้อน้ำ เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ในโรงงาน เป็นต้น วิธีการออกแบบอุปกรณ์หรือระบบที่มีการถ่ายเทหรือแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีนั้น ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น สมรรถนะในการถ่ายเทและแลกเปลี่ยนความร้อนสูง สามารถทำงานได้ตามความต้องการ ราคาถูก การเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูง โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด อายุการใช้งานที่ยืนยาว ต้องการบำรุงรักษาซ่อมแซมน้อย ยังมีความน่าเชื่อถือและปลอดภัย เพื่อให้ผ่านคุณลักษณะที่ต้องการเหล่านี้ ที่สำคัญต้องการพัฒนาความสามารถและศักยภาพของระบบถ่ายเทความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทำให้ลดการใช้พลังงานและมีขนาดที่เหมาะสม ทำให้มีการลดใช้วัสดุและพื้นที่ติดตั้งใช้งาน เพราะทำให้การจัดสรรและใช้ทรัพยากรและวัสดุอย่างคุ้มค่า รวมถึงลดภาวะเรือนกระจก

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 Active Techniques เป็นการใช้แหล่งพลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วย เช่น อุปกรณ์ทางไฟฟ้า อุปกรณ์ทางกล ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการสั่นของผิวทำให้ของไหลเกิดการสั่นสามารถเพิ่มสมรรถนะความร้อนได้ดียิ่งขึ้น และ กลุ่มที่ 2 Passive Techniques ใช้วิธีออกแบบลักษณะพื้นผิวของท่อแบบพิเศษต่างจากผิวเรียบและปรับปรุงของไหลหรือสารทำงานเพื่อให้มีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นโดยไม่ใช้พลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่นิยมกันในปัจจุบัน เรียกว่า Passive Method โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบวิธีที่ได้ผลดีมากที่สุดอย่างหนึ่งก็คือ การติดครีบบางขวางการไหลบนผนังภายในท่อ ส่งผลให้การเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ถึงแม้ว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวภายในท่อสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ทำให้เกิดความเสียหายภายในท่อมี่สูงขึ้น จึงทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในท่อ

หลักการนำเอาครีบและตัวสร้างการหมุนควงตามแนวยาวมาใส่ในท่อ ดังนั้นต้องพิจารณารูปร่าง, ขนาด, มุมและระยะพิตซ์ของแผ่นครีบ ส่งผลให้ลักษณะการไหลของของไหล การสูญเสียความดันและสูญเสียแรงเสียดทานเพื่อควบคุมการไหลภายในท่อ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษารทดลองในเรื่องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานที่มีครีบด้วยตัวสร้างการหมุนวนตามแนวยาว เนื่องจากท่อเป็นโครงสร้างสำคัญภายในของระบบหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยทั่วไปและหาตัวชี้วัดที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มสมรรถนะความร้อน เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้และออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานที่มีครีบด้วยตัวสร้างการหมุนควงตามแนวยาว การวิเคราะห์ทางการทดลอง เช่น มุมปะทะการไหล (α), อัตราส่วนความสูงครีบอกต่อความสูงช่องขนาน (e/D_n), การจัดวางครีบ, รูปทรงของปีกและตัวสร้างการหมุนควงตามแนวยาว เป็นต้น

1.2.2 ศึกษาแนวทางการเพิ่มสมรรถนะความร้อน และการสูญเสียความดันผ่านทางช่องขนานที่มีปีกด้วยตัวสร้างการหมุนวนตามแนวยาว

1.2.3 เปรียบเทียบผลการทดลองของท่อเปล่าและท่อมี่แผ่นขนานแนวตั้งติดปีกบนล่าง

1.2.4 เพิ่มความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรที่มีอิทธิพลหลักต่อการเพิ่มสมรรถนะความร้อนภายในช่องขนานมีปีกที่สร้างการหมุนวนตามแนวยาว

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ทำการศึกษาเชิงการทดลองเพื่อคำนวณหาค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) และตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะความร้อน (TEF) เลขนัสเซลท์ (Nu)

1.3.2 ของไหลที่ใช้ในการทดสอบ คือ อากาศ

1.3.3 ความเร็วอากาศ อยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ (Re) ระหว่าง 4000 ถึง 29000

1.3.4 การให้ความร้อนที่พื้นผิวโดยใช้แบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant heat flux) โดยให้ที่ผิวบนของท่อแผ่นขนาน

1.3.5 ปีกทดสอบ ในการศึกษา นี้ นิยามให้ ปีก คือ ปีกที่มีอัตราส่วนความหนาต่อความสูงให้ค่ามากกว่า 0.10 โดยปีกมีรูปทรง คือ สามเหลี่ยมหน้าจั่ว ชีทวนทิศทางการไหล

1.3.6 ปีกรูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่ว แบบความสูงสม่ำเสมอ อัตราส่วนความสูงปีกต่อความสูงช่องขนาน 3 แบบ, ปีกแบบความสูงสม่ำเสมอ 5 แบบ คือ ความสูง, $e = 4.5, 6.75$ และ 9 มิลลิเมตร อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงช่องขนานคงที่ (P/D_h) , $PR = 1, 1.5, 2, 2.5$ และ 3 ความหนา, $t = 0.8$ มิลลิเมตร

1.3.7 การติดตั้งปีกติดตั้งแบบ แผ่นขนานตั้งโดยที่มีปีก อยู่ด้านบนและล่างของแผ่นขนาน

1.3.8 หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเพิ่มสมรรถนะความร้อนภายในท่อ อาทิเช่น รูปทรง การจัดวาง ความสูง ความดันตกคร่อมในและการถ่ายเทความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะความร้อนภายในท่อด้วยการติดปีกและตัวสร้างการหมุนควงตามแนวยาว กลไกการไหลภายในท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

1.4.2 เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการประยุกต์ใช้งานในภาคการเกษตรกรรม

1.4.3 การสร้างเทคโนโลยีใหม่และหลักการเพิ่มสมรรถนะความร้อนการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อ

1.4.4 ลดขนาดและการใช้วัสดุในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต และ ยังสามารถลดสภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย

1.5 โครงร่างวิทยานิพนธ์

1.5.1 ศึกษาข้อมูลในเรื่องพฤติกรรมการไหลของอากาศ รูปร่างปีกและตำแหน่งของการติดตั้ง

1.5.2 ศึกษาทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล

1.5.3 ทำการออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยสร้างปีกที่มีสัดส่วนความสูงของปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (e/D_h) มากกว่า 0.10 มีระยะพิชต์ ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (P/D_h) เท่ากับ $1, 1.5, 2, 2.5$ และ 3 โดยปีกทำมุมแกนกลาง $30^\circ, 45^\circ$ และ 60°

1.5.4 ทำการทดลองเพื่อศึกษาค่าการเทความร้อนโดยแสดงในเทอมของเลข Nusselt number (Nu) และค่าการสูญเสียความดันโดยแสดงในเทอมของตัวประกอบความเสียดทาน Friction factor (f)

1.5.5 บันทึกผลการทดลองและทำการวิจารณ์ผลการทดลอง

1.5.6 สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการศึกษาเพิ่มสมรรถนะความร้อนภายในช่องขนานที่มีครีบด้วยตัวสร้างการหมุนวนตามแนวยาว จะทำให้รู้ถึงการศึกษาศาสตร์และเทคนิคที่ประยุกต์ใช้กับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีมา โดยจะนำไปประยุกต์ใช้หาแนวทางการ พัฒนาปรับปรุง เพื่อการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่สูงขึ้นในการศึกษาของงานวิจัยนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมมาก ดังนั้นจึงมีนักวิจัยจำนวนมากทั้งในประเทศไทยและในต่างประเทศที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามวิธีต่าง ๆ อันจะเป็นจุดเริ่มต้นการลดต้นทุน และ เป็นการลดภาวะโลกร้อนด้วยในเวลาเดียวกัน

ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างทิศทางของไหลที่ต่างกัน 2 ชนิด กระบวนการดังกล่าวสามารถพบได้เรื่อยไปตาม หม้อน้ำรถยนต์ คอนเดนเซอร์ในอุปกรณ์แอร์คอนดิชั่น อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่น้ำ คอยล์ร้อน หรือคอยล์เย็น ฯลฯ ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงตัวอย่างของกระบวนการที่ซึ่งความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างทิศทางของไหล 2 ชนิด โดยท่อของทั้งสองจะไม่มีคาน้ำของไหลมาปนกันเลยเพียงแต่แลกเปลี่ยนความร้อนเท่านั้น อุปกรณ์นั้น เรียกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดธรรมชาติ จะแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด โดยขึ้นอยู่กับการจัดวางทิศทางสัมพัทธ์ของทิศทางของไหลของทิศทางของไหลทั้ง 2 ชนิด ชนิดแรก ทิศทางทั้งสองไหลตัดซึ่งกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ เรียกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกันหรือตั้งฉากกัน (Cross-flow heat exchanger) ยกตัวอย่าง เช่น หม้อน้ำรถยนต์ หรือหน่วยหล่อเย็นในท่อระบบปรับอากาศ ชนิดที่สองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยเครื่องที่ซึ่งทิศทางของไหล 2 ชนิดเคลื่อนที่ในทิศทางขนานกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้คือแบบ shell-and-tube ถือเป็นเครื่องที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

ในปัจจุบันมีการศึกษาเรื่องของการปรับปรุงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนหรือสมรรถนะความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ โดยจะหาวิธีในการลดต้นทุนในด้านทรัพยากรทางการเงิน หรือ ด้านพลังงานก็ดี ดังนั้นจึงได้มีการค้นคว้าหาแนวความคิดและวิธีการในการปรับปรุงการเพิ่มสมรรถนะความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นจะมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหลากหลายงานวิจัยดังต่อไปนี้

Metzger et al. [1] ได้ทำการศึกษาลักษณะมุมครีบและตำแหน่งครีบ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่จุดใดต่าง ๆ ภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับตำแหน่งของครีบ แบบที่ 1 ครีบถูกติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม และแบบที่ 2 ครีบถูกติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม หลังจากทำการทดลองในหลายๆมุม อาทิเช่นมุม 30° 45° และ 60° ได้ผลว่าครีบที่ทำมุม 60° ให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อน(TEF) ได้ดีกว่าครีบมุมอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

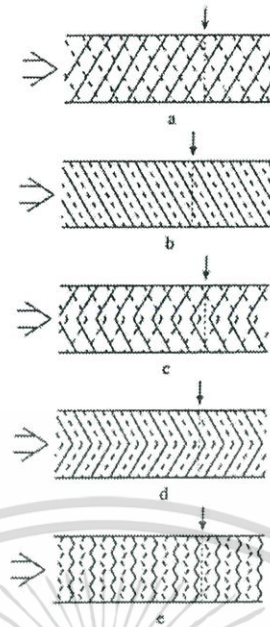
Han et al. [2] มีการศึกษาและทดลองของการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้ครีบริปูตัววีและครีบริปูสามเหลี่ยมมุมต่างๆ อาทิเช่นมุม 30° 45° และ 60° เพื่อให้เกิดการไหลปั่นป่วนพบว่า ครีบริปูสามเหลี่ยมให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อนได้ดีกว่าครีบริปูแบบอื่นๆ ที่ทำการศึกษามา

Zhang et al. [3] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของร่องระหว่างครีบริปูในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มี Aspect Ratio, $AR = 1-10$ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ $Re = 10,000-50,000$ ได้ผลว่าร่องระหว่างครีบริปูให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าผนังครีบริปู ในขณะที่เดียวกันมีค่าความดันตกคร่อมเท่ากัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าร่องระหว่างครีบริปูนั้นได้เพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนให้มากยิ่งขึ้น

Taslim et al. [4] ได้ทำการรายงานค่าของเลขนัสเซลที่จุดต่าง ๆ ภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบอันเนื่องมาจากมุมของครีบริปู รูปทรงครีบริปูที่มีลักษณะเป็นครีบริปูตัววี โดยแนวครีบริปูตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งที่ถูกให้ความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่น ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อนจะสังเกตได้ว่า ค่าของตัวเลขนัสเซลจะมีค่ามากที่สุดก็ต่อเมื่อแนวครีบริปูตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลของของไหลภายในท่อ

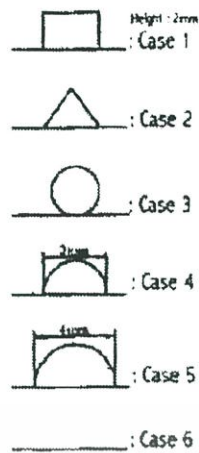
Gentry and Jacobi [5] ทำการออกแบบครีบริปูเพื่อให้เกิดการหมุนวนของของไหลที่ใช้คืออากาศ ซึ่งเป็นการเพิ่มระดับการปั่นป่วน และการพาความร้อนที่ดีขึ้นทำให้เกิดการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดีมากยิ่งขึ้นโดยการเพิ่มการหมุนวนที่หัวมุมของแผ่นเรียบ โดยค่าเฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อนดีขึ้นถึงประมาณ 50-60% โดยที่ผิวของแผ่นเรียบจะใช้ครีบริปูแบบ เดลต้า เพราะจะสามารถเพิ่มอัตราส่วนการไหลและมุมปะทะได้มากขึ้นกว่าครีบริปูแบบสามเหลี่ยมหน้าจั่ว

Olsson and Sunden [6] ได้มีการศึกษารูปแบบของการไหล, ความดันตกคร่อม และการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีการเพิ่มความปั่นป่วนด้วยการใส่ครีบริปูลงไป ศึกษาภายในช่วงที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 500-15,000$ และยังมีค่า Aspect Ratio, AR ของท่อสี่เหลี่ยม คือ 1-8, และครีบริปูติดกับผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ทำการทดสอบครีบริปูในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้ ครีบริปูที่ติดกันแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงข้าม, และครีบริปูติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงข้าม, ครีบริปูตัววีที่ติดในแนวเส้นตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงข้าม, ครีบริปูตัววีที่ติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงข้าม และครีบริปูตัววีแบบต่อสลับทิศทางกัน ลักษณะการจัดวางครีบริปูเป็นแบบแนวครีบริปูตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลสลับกันตลอดทั่วหน้าตัด บนผิวท่อที่อยู่ตรงข้าม การถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมถูกแสดงโดยตัวประกอบ j (Colburn heat transfer factor) และตัวประกอบ C_f (Fanning friction factor) พบว่า ครีบริปูตัววีแบบต่อสลับทิศทางกันให้ค่าตัวประกอบ j และค่าตัวประกอบ C_f สูงกว่าครีบริปูในรูปแบบอื่น ๆ ที่ทำในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 1,000-2,000$



รูปที่ 2.1 โครงสร้างครีบริบ: (a) cross rib-roughened (b) parallel rib-roughened (c) cross V-rib-roughened (d) parallel V-rib-roughened (e) Swirl Flow Tube ของ Olsson and Sunden [6]

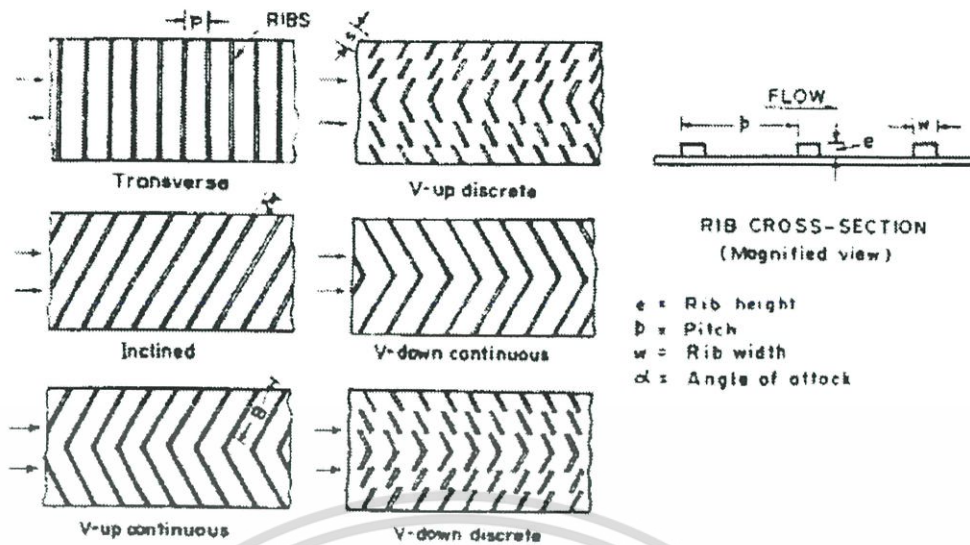
Ahn [7] ได้ทำการศึกษาค่าตัวประกอบเสียดทานที่อยู่ในท่อทรงสี่เหลี่ยม โดยทำการศึกษารูปทรงครีบริบทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ ครีบริบสี่เหลี่ยม ครีบริบสามเหลี่ยม ครีบริบวงกลม ครีบริบครึ่งวงกลมทรงต่ำ และครีบริบครึ่งวงกลมทรงสูง โดยได้ทำการศึกษาที่อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบริบ (P/e) เท่ากับ 8 และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูง เท่ากับ 2.33 ในส่วนของความสูงครีบริบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ 0.0476 และรูปแบบครีบริบดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากการทดสอบจะพบได้ว่า แผ่นครีบริบสามเหลี่ยมมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด และรองลงมาคือแผ่นครีบริบรูปสี่เหลี่ยม ในส่วนของครีบริบวงกลมและครีบริบครึ่งวงกลมนั้นมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน ได้ทำการศึกษาในช่วงที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 10,000$ แผ่นครีบริบสามเหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นเรียบถึง 3 เท่าตัว และเมื่ออยู่ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 20,000$ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพราะว่าค่าเลขเรย์โนลด์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามด้วยนั่นเอง แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมกลับพบได้ว่าแผ่นครีบริบสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่มากกว่าแผ่นชนิดอื่น ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นและตามด้วยแผ่นครีบริบสี่เหลี่ยม



รูปที่ 2.2 รูปแบบครีบบนท่อสี่เหลี่ยมของ Ahn [7]

Choi et al. [8] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบของเสียดทานภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและทำการศึกษาเกี่ยวกับความร้อนที่ให้กับท่อสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นฟลักซ์ความร้อนที่คงที่ โดยมีการติดครีบบรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลและครีบบรูปตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหล ซึ่งทำมุม 45° จากผลการทดลองจะพบได้ว่า ครีบบรูปตัววีซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลให้การถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบเสียดทานได้มากกว่าครีบบรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลของของไหล ของไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ก็คือ อากาศ

Karwa [9] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในท่อสี่เหลี่ยมที่มีการติดตั้งครีบบด้านเดียว โดยครีบบที่ทดสอบมีลักษณะเป็นครีบบตรง ครีบบเอียง ครีบบรูปตัววี ทั้งนี้มีลักษณะยาวต่อเนื่องและแบบแยกส่วน โดยใช้อุปกรณ์ที่ทดสอบมีอัตราส่วนความสูงครีบบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ 0.0476 และ 0.050 และมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงท่อสี่เหลี่ยมเท่ากับ 7.19 ถึง 7.75 และอัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบบ (P/e) เท่ากับ 10 โดยครีบบรูปตัววีที่ทดสอบเป็นครีบบรูปตัววีทำมุม 60° และครีบบทแยงมุม โดยทำการทดลองในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 2,800-15,000$ และความร้อนที่ให้กับท่อสี่เหลี่ยมเป็นฟลักซ์ความร้อนคงที่ รูปแบบครีบบนท่อสี่เหลี่ยม จะจัดแสดงในรูปที่ 2.3



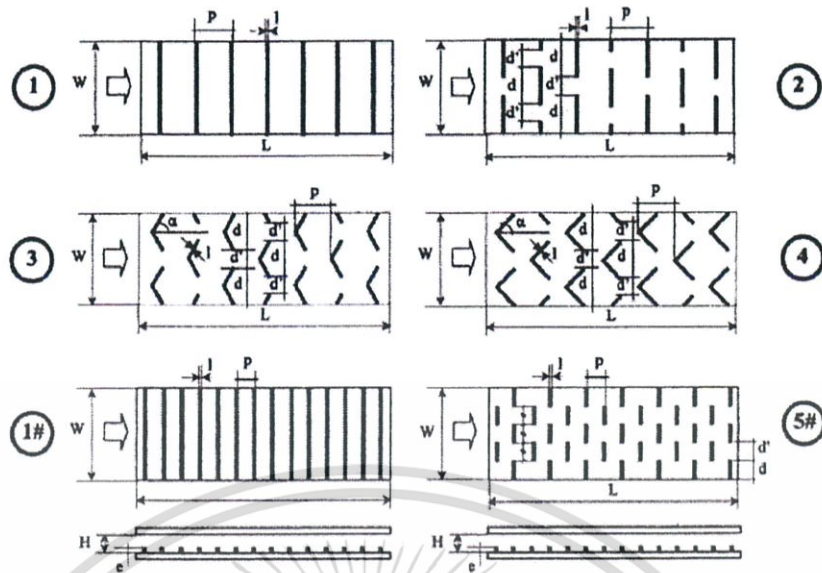
รูปที่ 2.3 รูปแบบครีบบนท่อสี่เหลี่ยมของ Karwa [9]

จากผลการทดลองจะพบว่า แผ่นครีบบรูปตัววียาวที่มีความยาวต่อเนื่อง ทำให้เกิดค่าตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด และมีค่ามากกว่าแผ่นเรียบประมาณ 3.40 ถึง 3.92 เท่า และในของส่วนแผ่นครีบบรูปตัววีชนิดยาวไม่ต่อเนื่องจะมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแผ่นครีบลักษณะต่าง ๆ และมีค่ามากกว่าแผ่นเรียบประมาณ 2.35 ถึง 2.47 เท่า ในขณะที่ค่าเลขสแตนต์ตัน (Stanton number, St) สำหรับแผ่นครีบบรูปตัววีมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลจะมีแนวโน้มมากที่สุดคือ 2.10 ถึง 2.47 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ และจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับครีบบนท่อสี่เหลี่ยมแบบต่อเนื่อง

Tanda [10] ทำการศึกษาค่าของการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนภายในท่อรูปสี่เหลี่ยมที่มีลักษณะของครีบบยาวต่อเนื่องและครีบบยาวไม่ต่อเนื่อง จะทำการทดลองในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 8,900-28,500$ อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบบ (P/e) เท่ากับ 8 และ 13.3 ในส่วนของอัตราส่วนของความสูงครีบบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ 0.09 และ 0.15 และอัตราส่วนความสูงครีบบต่อความสูงแผ่นช่องขนานเท่ากับ 0.15 และ 0.25 รูปแบบครีบบนท่อสี่เหลี่ยมแสดงในรูปที่ 2.4

โดยครีบบมีจะขนาดความหนา (t) 3 มิลลิเมตร ความสูง (e) 3 และ 5 มิลลิเมตร และระยะพิชต์ (P) 40 มิลลิเมตร แผ่นครีบบรูปตัววีมุม 45° และ 60° และครีบบที่มีลักษณะของความยาวที่ไม่ต่อเนื่องมีระยะห่างระหว่างแต่ละครีบบ (d') 20 มิลลิเมตร

จากการทดลองพบได้ว่าลักษณะของครีบบนท่อสี่เหลี่ยมจะให้ค่าการเพิ่มสมรรถนะความร้อนเพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางครีบบและรูปแบบครีบบ ค่าการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของครีบบมีค่าเพิ่มขึ้น ครีบบยาวที่ไม่ต่อเนื่องที่มาจากระยะพิชต์ 50 มิลลิเมตร มีค่าการเพิ่มสมรรถนะความร้อนมากกว่าที่ระยะพิชต์ 30 มิลลิเมตร ส่วนในเรื่องของค่าตัวประกอบเสียดทาน จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความสูงของครีบบมีค่าลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 2.4 รูปแบบครีบกภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Tanda [10]

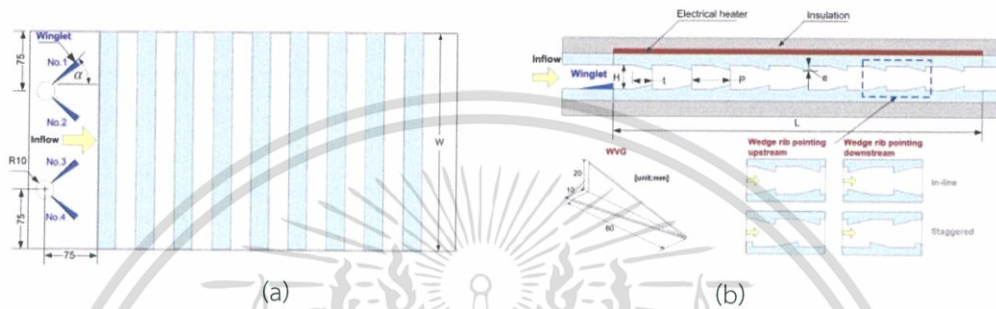
Bopche และ Tandale [11] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนลักษณะรูปทรงตัวยูที่บริเวณพื้นผิวดูดซับของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Air Heater, SAH) โดยทำการทดลองที่ช่วงเรย์โนลด์ส์ 3800 ถึง 18,000 มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก $D_h = 37.63$ มม. และความสูงของอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนมีค่าที่ $e = 0.7$ ถึง 1.5 มม. อัตราส่วนความสูงของอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) จึงมีค่าตั้งแต่ $e/D_h = 0.0186$ ถึง 0.03986 และมีค่าระยะพิตซ์ $p = 10$ ถึง 40 มม. อัตราส่วนระยะพิตซ์ต่อความสูงของอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน $p/e = 6.67$ ถึง 57.14 อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนมีการใช้มุมปะทะของการไหล $\alpha = 90^\circ$ จากการทดลองพบว่าเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ การที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนภายในท่อมีการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นทั้งในรูปเลขนัสเซลท์ (Nu) และตัวประกอบเสียดทาน (f) โดยมีการเพิ่มขึ้นเป็น 2.82 และ 3.72 เท่า



รูปที่ 2.5 รูปแบบครีบของ Bopche และ Tandale [11]

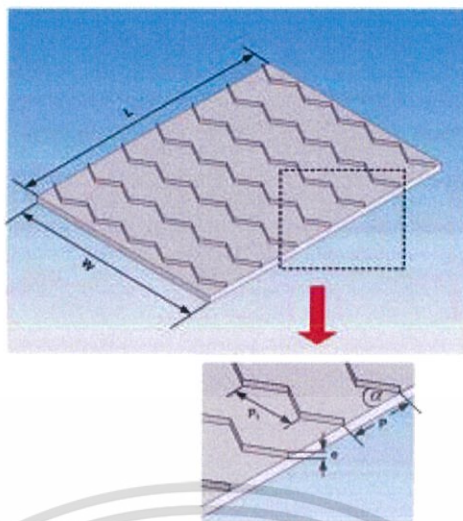
Chompookham et al. [12] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของครีบทรงลิ้ม (wedge ribs) และอุปกรณ์ผลิตการหมุนควงแบบปีกเล็ก (winglet-type vortex generators, WVGs) ที่จะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียจากความเสียดทานสำหรับการไหลของของไหลภายในแบบปั่นป่วนตลอดพื้นที่หน้าตัดของช่องทางแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ นำครีบริรูปลิ้ม 2 แบบมาทำการทดลองโดยครีบริที่ใช้ ได้แก่ครีบริรูปลิ้มแบบซี่ทวนทิศการไหลและซี่ตามทิศการไหล จัดวางครีบริทั้งสองแบบในลักษณะที่ผนังตรงข้ามกันภายในช่องทาง โดยเป็นวางแบบเยื้องกันและตรงแนวกัน ทั้งนี้ยังมีการติดตั้งอุปกรณ์ผลิตการหมุนควงแบบปีกเล็ก (WVGs) 2 คู่ ทำมุมปะทะเอกสารถี่เป็นเอกสารถี่ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

60° มีสัดส่วนของขนาด (Aspect Ratio) $AR = 10$ และ ความสูง $H = 30$ มม. อัตราส่วนความสูงครีบอกต่อความสูงท่อ(blockage ratio) $e/H = 0.2$ และอัตราส่วนระยะพิตช์ของครีบอกต่อความสูงท่อ $P/H = 1.33$ มีอัตราการไหลซึ่งจะแสดงในพจน์ของเลขเรย์โนลด์ส์โดยขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของช่องขนานอยู่ในช่วง 5000 ถึง 22,000 พบว่าค่าเลขเรย์โนลด์ส์และตัวประกอบความเสียดทานซึ่งได้จากการใช้ครีบอกร่วมกับ WVGs ทำให้พบว่าการใช้ครีบอกร่วมกับWVGsจะมีค่าที่สูงกว่าการใช้อุปกรณ์ใดเพียงอย่างเดียว การใช้ WVGs ร่วมกับครีบอกรูปลิ้มในลักษณะการวางเยื้องกันซึ่งทวนกระแสนั้นจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงที่สุดในขณะที่ครีบอกรูปลิ้มที่มีลักษณะการวางในแนวตรงกันซึ่งตามการไหลนั้นจะให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงสุด



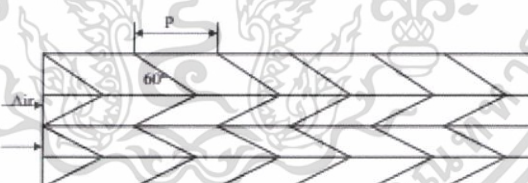
รูปที่ 2.6 ชุดทดสอบของ Chompookham et al. [12] (a) ชุดทดสอบ (b) รูปปีกเล็กและครีบอกรูปลิ้ม

PRomvong [13] เป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องของพฤติกรรมการพาความร้อนแบบปั่นป่วนและการสูญเสียจากความเสียดทานของอากาศที่ไหลผ่านเนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนแบบแผ่นกันรูปตัววีภายในช่องขนานที่ ทำมุมปะทะ 60° ทำการทดสอบบนช่องขนาน (Aspect Ratio) $AR = 10$ และความสูงช่อง $H = 30$ มม. ด้วยแผ่นกันที่มีอัตราส่วนการกัน (blockage ratio) $e/H = 0.10, 0.20$ และ 0.30 และอัตราส่วนระยะพิตช์ $P/H = 1, 2$ และ 3 ขณะที่ระยะพิตช์ตามแนวขวางของแผ่นกันตัววีมีค่าเท่ากับ $2H$ อัตราการไหลของอากาศในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ 5000 ถึง 25,000 ผลการทดลองพบว่าแผ่นกันตัววีส่งผลให้การเพิ่มค่าเลขเรย์โนลด์ส์ ตัวประกอบเสียดทาน และ ตัวประกอบการเพิ่มเชิงความร้อน มีค่าเพิ่มสูงกว่าท่อผิวเรียบเนื่องจากการไหลผสมซึ่งมีผลมาจากการไหลแบบปั่นป่วน นอกจากนี้ค่าเลขเรย์โนลด์ส์และตัวประกอบเสียดทานที่เพิ่มมากขึ้นนั้นพบว่าเป็นไปตามการเพิ่มของ e/H และ P/H หรือ การลดลงของค่า PR สมรรถนะเชิงความร้อนของช่องขนานแผ่นกันตัววีจะพบว่าที่ $PR = 1$ และ $e/H = 0.10$ จะให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มเชิงความร้อนมากที่สุดประมาณ 1.87 ที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่ำ



รูปที่ 2.7 รูปครีบริ้วทำมุม 60° ของ PRomvong [13]

Lanjewar et al. [14] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ทำผิวให้มีความขรุขระด้วยรูปครีบริ้วที่ผนังทำมุมเอียงกับทิศทางการไหล โดยจะทดลองคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูง $W/H = 8.0$ อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงครีบริ้ว $p/e = 10$ อัตราส่วนความสูงครีบริ้วต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก e/D_h ช่วง $0.018 - 0.03375$ และมุมปะทะการไหล α ในช่วง $30 - 75^\circ$ อัตราการไหลของอากาศสอดคล้องกับเลขเรย์โนลด์สระหว่าง $2300 - 14,000$ ผลการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบภายใต้การไหลและชั้นขอบเขตเชิงความร้อนเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสำหรับท่อขรุขระ



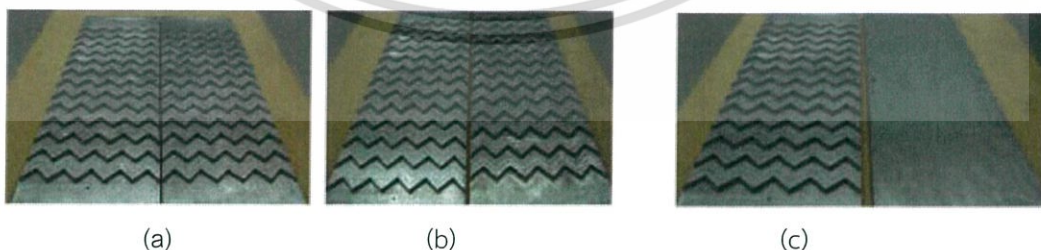
รูปที่ 2.8 รูปครีบริ้วทำมุม $30^\circ - 75^\circ$ ของ Lanjewar et al. [14]

Sriromreun et al. [15] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนที่ส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการทดลองแผ่นกั้นจะถูกจัดวางในรูปร่างลักษณะรูปตัว Z หรือซิกแซก (zigzag shape) วางเป็นอนุกรมบนผนังด้านบนของช่องขนานที่มีค่าพิทช์ความร้อนคงที่ โดยทำการทดสอบในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์สในช่วง 4400 ถึง $20,400$ จัดวางแผ่นกั้นตัว Z ให้ทำมุมเอียง 45° สัมพัทธ์กับทิศทางการไหล ซึ่งถูกแสดงลักษณะโดยอัตราส่วนความสูงแผ่นกั้นต่อความสูงช่องขนาน 3 ชุด $e/H = 0.1, 0.2$ และ 0.3 และอัตราส่วนระยะพิทช์ของแผ่นกั้นต่อความสูงท่อ $P/H = 1.5, 2$ และ 3 จากผลการทดลองจะพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียจากความเสียดทานมีค่าเพิ่มสูงกว่าท่อผนังเรียบ ดังเลขนัสเซลท์ ตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสำหรับ แผ่นกั้นตัว Z มุม 45° ทางเดียวกัน (in-phase) พบว่ามีค่า e/H มากกว่าให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียจากความเสียดทานที่สูงกว่า แผ่นกั้นตัว Z มุม 45° กลับทางกัน (out-phase) นั้นมีค่า e/H น้อยกว่า ที่เงื่อนไขการทดสอบที่เหมือนกัน ความยาวระยะพิทช์ที่สั้นกว่าจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ค่า Nu, f และ TEF ที่สูงกว่าที่ความยาวระยะพิชต์ที่มาก จากการทดลองเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการณ์ถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานการไหลของแผ่นกั้นตัว Z มุม 45° ในช่องขนานมีค่าที่ตรงกับทดลอง

PRasad [16] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ที่ทำผิวให้ขรุขระ ข้อมูลการไหลปั่นป่วนที่พัฒนาเต็มจะเก็บผลภายใต้สภาวะอากาศกลางแจ้งตามความเป็นจริง ดังเช่น เครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ ถูกพบในการกำหนดค่าที่สูงของตัวประกอบการเคลื่อนย้ายความร้อนของอุปกรณ์เก็บสะสม (collector heat removal factor, F_R) ตัวประกอบประสิทธิภาพอุปกรณ์เก็บสะสม (collector efficiency factor, F^*) และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency, Δ_{th}) ตามที่เปรียบเทียบกับค่าที่สอดคล้องกันของอุปกรณ์สะสมผิวเรียบ ในช่วงของพารามิเตอร์ที่ทดสอบ อัตราส่วนค่าพารามิเตอร์ F_R , F^* และ Δ_{th} สำหรับอุปกรณ์สะสมผิวเรียบเทียบกับอุปกรณ์สะสมผิวเรียบพบว่ามีค่าเป็น 1.786, 1.806 และ 1.842 เท่าตามลำดับ

Tamna et al. [17] เป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานของเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดการไหลหมุนควงแบบแผ่นกั้นตัววีหลายชุด (multi V-baffle vortex generator, BVG) ในการทดสอบอากาศไหลผ่านช่องขนานทดสอบภายใต้สภาวะพลังความร้อนที่ผนังสม่ำเสมอที่แผ่นดูดซับ และทดสอบในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์สในช่วง ตั้งแต่ 4000 ถึง 21,000 โดยแผ่นกั้นตัววีที่นำมาใช้มีความสูงแผ่นกั้นสัมพันธ์ (blockage ratio) $BR = b/H = 0.25$ และทำมุมปะทะ 45° กับทิศทางการไหล อัตราส่วนระยะพิชต์ของแผ่นกั้นต่อความสูงของช่องขนานที่ต่างกัน 3 ค่า $PR = P/H = 0.5, 1$ และ 2 ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมในพจน์ของเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทาน ทดสอบ การจัดวาง BVG 3 แบบ ได้แก่ ติดตั้ง BVG ที่ผนังด้านบนด้านเดียว ติดตั้ง BVGs ที่ผนังทั้งด้านบนและด้านล่างในแนวตรงกัน (in-line) และ ติดตั้งเอียงกัน (staggered) จากการทดลองพบว่า ยิ่งค่า PR มีค่าน้อยจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดสำหรับ BVG ทั้งหมด BVG ที่ติดแนวเดียวกันจะให้ผลการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียจากความเสียดทานสูงกว่า BVG แนวเอียงกันและ BVG ด้านเดียว จากการทดสอบ BVG ที่ติดด้านเดียวที่ $PR=0.5$ ให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดในการลดแสงของกลไกการถ่ายเทความร้อน การทำงานเชิงตัวเลขถูกนำเสนอในการทดสอบคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของของไหลในช่องขนานที่ติดด้วย BVG ทำมุม 45° และในการนำในการเปรียบเทียบพบว่าผลจากการทดลองเชิงตัวเลขสอดคล้องกับผลการทดลอง



รูปที่ 2.9 รูปการจัดวางครีษชุดทดสอบของ Tamna et al. [17], (a) วางแนวเดียวกัน, (b) วางแนวเอียงกัน, และ (c) วางครีษที่แผ่นบนอย่างเดียว

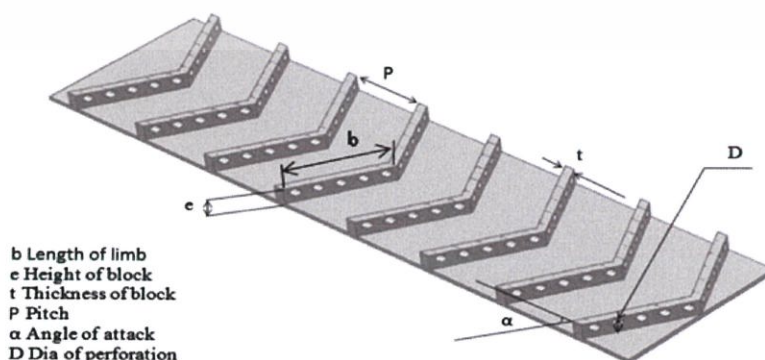
Skullong et al. [18] ศึกษาเกี่ยวข้องกับการศึกษาเชิงทดลองด้านคุณลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ ด้วยการติดตั้งครีษห้ร่วมกับตัวสร้างความปั่นป่วน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบร่อง ช่องขนานทดสอบที่ผนังด้านบนมีการให้พลั๊กความร้อนคงที่ และควบคุมอัตราการไหลของอากาศเพื่อให้เลขเรย์โนลด์ส์อยู่ในช่วง 4000 ถึง 21,000 ครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยมติดตั้งบนผนังช่องขนานทดสอบแบบร่อง อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงช่องขนานที่ต่างกัน $PR=P/H=0.5, 1$ และ 2 และ อัตราส่วนความสูงครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยมต่อความสูงช่องขนาน $BR=b/H=0.25$ ทำมุมปะทะ 45° กับทิศการไหลทำการทดสอบด้วยการจัดวางครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยม 3 แบบ ได้แก่ ครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยมที่ผนังด้านบนด้านเดียว ครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยมและร่องวางแนวเดียวกันที่ผนังบน-ล่าง และวางครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยมและร่องวางแนวเดียวกันที่ผนังด้านบน-ล่างผลการทดลองแสดงว่าการใช้ครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยมและร่องวางแนวเดียวกันที่ทั้งผนังด้านบนและล่างของชุดทดสอบให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับท่อผนังเรียบพร้อมครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยมหรือปราศจากครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยม อย่างไรก็ตามครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยมและร่องที่ผนังด้านบนที่ $PR=0,5$ ให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุด และการใช้ครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยมและร่องวางแนวเดียวกันให้ค่าสูงสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าร่องอย่างเดียว



รูปที่ 2.10 รูปการจัดวางครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยมชุดทดสอบของ Skullong et al. [18], (a) วางแนวเดียวกัน และ (b) วางแนวเยื้องกัน

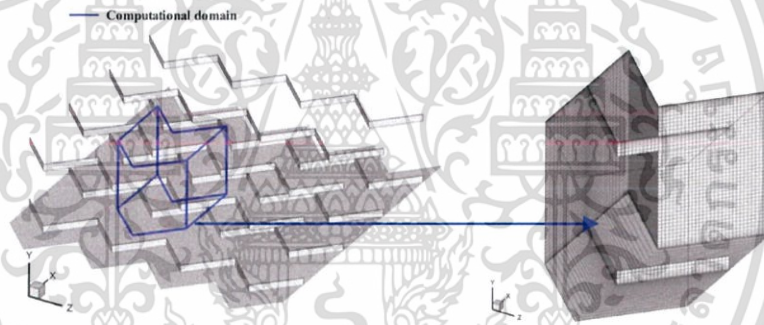
Alam et al. [19] เป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของรูพรุนที่ไม่เป็นรูปวงกลมของแผ่นกั้นรูปตัววีที่ติดตั้งบนผนังให้ความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าของเครื่องอุณหอากาศร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ทดสอบด้วยรูปร่างต่าง ๆ 5 แบบ ดังนี้ รูกลม รูจตุรัส จนถึงรูสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีสัดส่วนวงกลมในช่วงตั้งแต่ $1 - 0.6$ โดยใช้ทดสอบร่วมกับการเปลี่ยนระยะพิชต์สัมพันธ์ตั้งแต่ $4 - 12$ ความสูงแผ่นกั้นสัมพันธ์ตั้งแต่ $0.4 - 1.0$ อัตราส่วนช่องตั้งแต่ $5 - 25\%$ และมุมปะทะตั้งแต่ $30^\circ - 75^\circ$ ทดสอบที่ช่วงการไหลที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ระหว่าง 2000 ถึง $20,000$ พบว่ายังคงมีรูพรุนรูปร่างไม่เป็นวงกลมที่เหมาะสมที่ให้ค่าเลขนัสเซลท์มากที่สุด รูกลมที่สมบูรณ์แบบทำให้เกิดการรบกวนอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับรูที่ไม่เป็นวงกลมที่พิจารณา $\psi = 0.69$ การปรับปรุงค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ 1.13 เท่าพบว่าเมื่อแผ่นกั้นรูพรุนวงกลมถูกแทนที่โดยรูสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีสัดส่วนวงกลม 0.69 สหสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานถูกสร้างขึ้นในพจน์ของเลขเรย์โนลด์ส์และพารามิเตอร์รูปทรงของการกั้นซึ่งถูกนำมาในการทำนายค่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานที่มีความแม่นยำ



รูปที่ 2.11 รูปครีบบัวยกรูปสามเหลี่ยมชุดทดสอบของ Alam et al. [19]

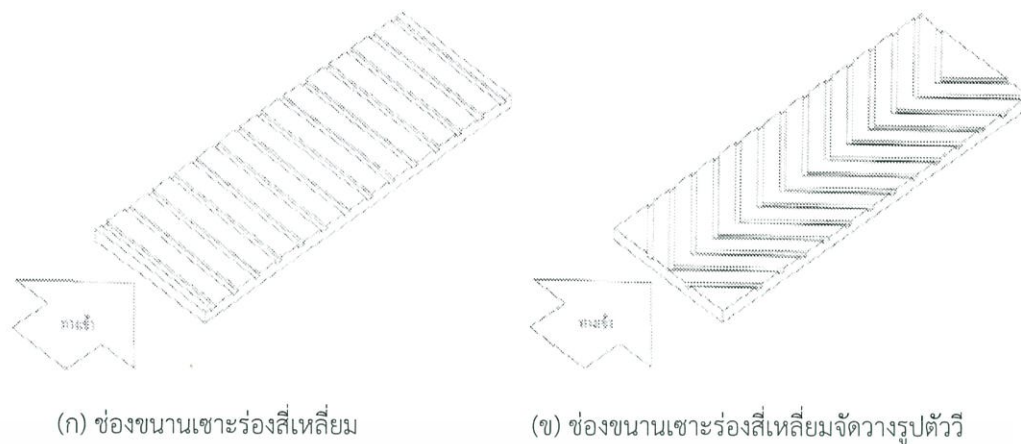
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sripattanapipat [20] เป็นการนำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบในช่องการไหลที่มีอุณหภูมิผิวคงที่ โดยมีการติดตั้งแผ่นกั้นรูปคลื่นแบบสามเหลี่ยมที่ผนังผิวบนและผิวล่างในลักษณะตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งมีมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° ตามลำดับ และมีอัตราส่วนการปิดกั้นการไหล (Blockage ratio) $BR = 0.05$ ถึง 0.30 สำหรับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น (Pitch ratio) $PR = 1.0$ สำหรับมุมปะทะ $45^\circ, 60^\circ$ และ 90° ส่วนมุมปะทะ 30° จะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นตั้งแต่ 0.5 ถึง 2.0 ในการศึกษาครั้งนี้อัตราการไหลที่ใช้จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number, Re) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 100 จนถึง $1,000$ จากผลลัพธ์ที่ได้จากช่องการไหลที่มีการติดแผ่นกั้นถูกนำไปเปรียบเทียบกับช่องการไหลผิวเรียบพบว่าการติดแผ่นกั้นจะมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าช่องการไหลผิวเรียบ และการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการปิดกั้นการไหล ทำให้ค่าเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการวิเคราะห์สนามการไหลพบว่า เมื่อมุมปะทะของแผ่นกั้นมีขนาดเล็กลง จะทำให้เกิดการหมุนวนตามทิศทางการไหลซึ่งจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ในขณะที่ความดันก็จะลดลงอีกด้วย ทำให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อน (TEF) ของแผ่นกั้นรูปคลื่นสูงกว่าแผ่นกั้นขวางที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยมีค่า TEF สูงสุดเท่ากับ 2.33 ที่ $BR = 0.075, PR = 1.00$ ที่ $Re = 1,000$ ของแผ่นกั้นรูปคลื่นมุมปะทะ 30°



รูปที่ 2.12 โครงสร้างช่องขนานและโดเมนการคำนวณเชิงตัวเลขของ Sripattanapipat [20]

บุรณโชคไพศาล [21] ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องขนานด้วยการเจาะร่องพื้นผิวภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้อากาศเป็นของไหลในการทดสอบ ช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ $500-20,000$ เปรียบเทียบผลทดลองระหว่างท่อผิวเรียบที่ไม่ได้เจาะร่องกับท่อเจาะร่องสี่เหลี่ยม, ท่อที่มีการเจาะร่องสี่เหลี่ยมจัดวางเป็นรูปตัววี และท่อเจาะร่องสี่เหลี่ยมที่มีการเพิ่มครีบบนสี่เหลี่ยม จัดวางเป็นแบบตรงกันและเอียงกัน รูปแบบของครีบบนและการจัดวางครีบบนแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ท่อที่มีการเจาะร่อง เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน ที่ค่า $e/D_h = 0.33$ ท่อที่เจาะร่องจัดวางเป็นรูปตัววีให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูงสุด ขณะที่ค่า $e/D_h = 0.25$ และ $e/D_h = 0.20$ ท่อที่เจาะร่องและเพิ่มครีบบนจะให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูงสุด และท่อที่มีการเจาะร่องจัดวางเป็นแบบเอียงกัน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการจัดวางเป็นแบบตรงกัน แต่ผลจะตรงกันข้ามในกรณีที่ตั้งครีบบนเพิ่มเข้าไป



(ก) ช่องขนานเซาะร่องสี่เหลี่ยม

(ข) ช่องขนานเซาะร่องสี่เหลี่ยมจัดวางรูปตัววี



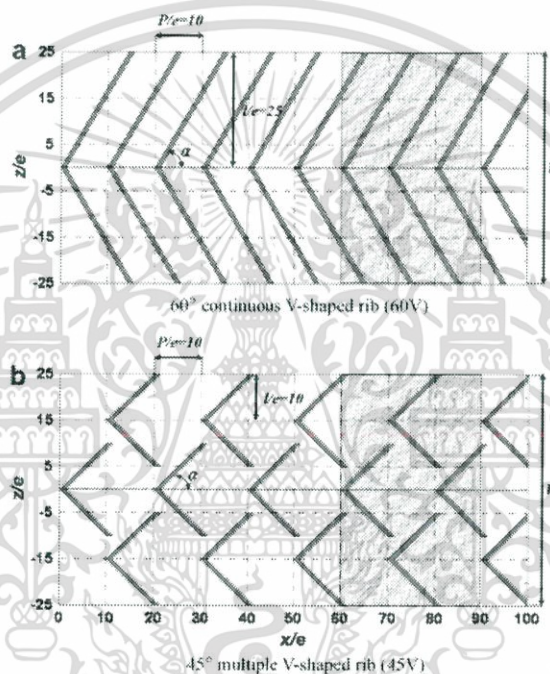
(ค) ช่องขนานเซาะร่องที่มีการเพิ่มครีบลีเหลี่ยม

รูปที่ 2.13 การจัดวางครีบบนแบบตรงกันและเอียงกันของ บูรณโชคไพศาล [21]

Sripattanapipat and PRomvonge [22] ทำการวิเคราะห์ในเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบเรียบแบบ 2 มิติ ในช่องขนานที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปเพชรที่ผนังด้านบนและด้านล่างแนวเอียง โดยจะคิดลักษณะของการไหลเป็นคาบ โดยใช้เงื่อนไขที่อุณหภูมิของผนังคงที่ เลขเรย์โนลด์ในช่วง 100-600 พบว่าเมื่อทำการลดมุมที่ยอดรูปเพชรจะทำให้ค่าเลขนัสเซิลท์และความเสียดทานเพิ่มขึ้น และได้พบว่าทุกค่าเลขเรย์โนลด์ที่ใช้มุมยอดเพชรที่ 5° และ 10° ทำให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อนสูงกว่ามุมยอดเพชรที่ 0° (แผ่นกั้นแบน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hyun Lee and Rhee [23] ทำการศึกษาในรูปแบบการไหล, การถ่ายเทความร้อน และกำลังงานของการขับปั๊มในท่อสี่เหลี่ยมที่มีการติดตั้งครีบริบตัววี ทำมุม 60° ครีบริบแบบเดี่ยวต่อเนื่อง และครีบริบตัววีทำมุม 45° หลายครีบริบวางตำแหน่งสลับแถว ค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 10,000 - 30,000$ โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) มีค่าเท่ากับ 75, 50, 38.4 ค่า Aspect Ratio เท่ากับ 3, 5, 6.8 อัตราส่วนความสูงของครีบริบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) มีค่าเท่ากับ 0.04, 0.06, 0.078 และอัตราส่วนระยะของพิตช์ต่อความสูงครีบริบ (P/e) เท่ากับ 10 รูปแบบของครีบริบ แสดงในรูปที่ 2.14 จากผลการทดลองพบว่า ครีบริบตัววีที่ทำมุม 60° แบบครีบริบเดี่ยวต่อเนื่องทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนมากกว่าครีบริบตัววีมุม 45° หลายครีบริบวางสลับแถว และการใช้กำลังงานที่ของการขับปั๊มครีบริบตัววีมุม 45° หลายครีบริบวางตำแหน่งสลับแถวจะใช้น้อยกว่าครีบริบตัววีมุม 60° แบบครีบริบเดี่ยวต่อเนื่อง

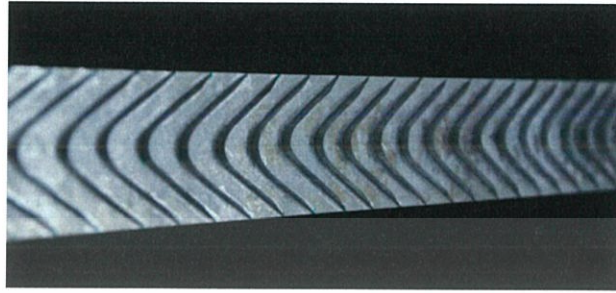


รูปที่ 2.14 รูปแบบครีบริบภายในท่อสี่เหลี่ยมของ Hyun Lee and Rhee [23]

สุชเตียม [24] ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้ครีบริบตัววีที่สภาวะการถ่ายเทความร้อนที่ผิวแบบคงที่ และทำการทดลองในช่วงเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,200 - 26,000$ ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผนังเรียบกับท่อที่สอดครีบริบตัววีในลักษณะทแยงมุม โดยปลายตัววีชี้รับกระแสลมที่มุม 30° , 45° และ 55° อัตราส่วนความสูงของครีบริบต่อความสูงท่อ $b/H = 0.11, 0.15$ และ 0.19 อัตราส่วนระยะของพิตช์ต่อความสูงช่องขนาน $PR = 0.66, 1.32$ และ 1.98 แผ่นที่ใช้ทดสอบ แสดงในรูปที่ 2.11 จากผลการทดลองพบว่าชุดทดลองที่สอดครีบริบตัววีทำมุม 30° , 45° และ 55° ให้ค่าเลขนัสเซิลท์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่า $b/H = 0.19$ และ $PR = 0.66$ ครีบริบมุม 30° , 45° และ 55° ทำให้ค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยมีค่ามากกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผนังเรียบ 2.71, 2.14 และ 3.18 เท่า ตามลำดับ แต่ความเสียดทานก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ครีบริบมุม 30° , 45° และ 55° ให้ตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมีค่ามากกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผนังเรียบ 1.66, 6.26 และ 6.36 เท่า ตามลำดับ ส่งผลให้การเพิ่มของสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีดังนี้ ครีบริบที่ทำมุม 30° อัตราส่วนระยะของพิตช์ต่อความสูงช่องขนาน $PR = 0.66$ และ อัตราส่วนของความสูงครีบริบต่อความสูงท่อ $b/H = 0.19$ ทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

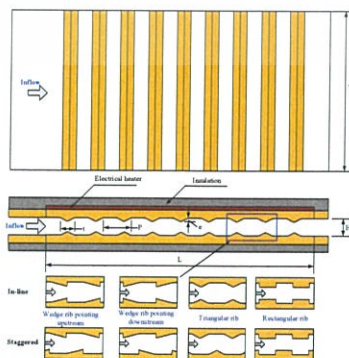
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลี่ยมีค่ามากกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผนังเรียบ 2.28 เท่า และครีบบุม 45° , 55° อัตราส่วนระยะของพิตช์ต่อความสูงช่องขนาน $PR = 0.66$ และ อัตราส่วนความสูงครีบบต่อความสูงท่อ $b/H = 0.19$ ทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผนังเรียบ 1.71 และ 1.16 เท่า ตามลำดับ

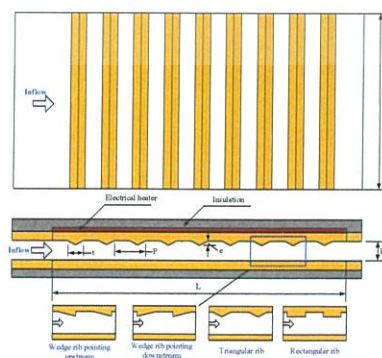


รูปที่ 2.15 ครีบบรูปตัวยูของ สุขเตียม [24]

ขมภูคำ [25] ทำการศึกษาการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อขนานสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีครีบบ (W/H , AR) = 10, ความสูงของช่องขนาน (H) = 30 มิลลิเมตร ทดลองในช่วงเลขเรย์โนลด์ส (Re) ตั้งแต่ 5,000 ถึง 23,000 พบว่า การใช้ครีบบหน้าร่วมกับปีกจัดวางครีบบแนวตรงกันและมุมปะทะของปีกค่าสูง ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานเพิ่มขึ้นมากกว่าการจัดวางครีบบแนวเอียงกันและมุมปะทะของปีกค่าต่ำกว่า การเพิ่มสมรรถนะความร้อน (TEF) ของครีบบหน้าแบบสามเหลี่ยมหน้าจั่ว ที่ความสูงค่าต่ำกว่า จัดวางครีบบในแบบเอียงกันและปีก $\alpha = 30^\circ$ ให้ค่าที่สูงที่สุด ครีบบหน้าสามเหลี่ยมหน้าจั่วให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด จากนั้นได้ทำการศึกษาครีบบหน้าสามเหลี่ยมหน้าจั่ว แบบความสูงสม่ำเสมอ $e/H = 0.13$, 0.2 และ 0.26 แบบความสูงที่ไม่สม่ำเสมอ $e/H = 0.13$, 0.2 สลับกัน ที่ $P/H = 1.33$ ปีกสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม, แบบ 5 คู่และ 10 คู่, อัตราส่วนของความสูงปีกต่อความสูงช่องขนาน $b/H = 0.2$, 0.3 และ 0.4 จัดวางในทิศทางชี้ตามการไหลและชี้ทวนการไหล ที่ทำมุมปะทะ 3 ค่า คือ 30° , 45° และ 60° พบว่า การใช้ครีบบร่วมกับปีกทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับท่อผนังเรียบ ปีกสี่เหลี่ยม 10 คู่ ชี้ทวนทิศทางในการไหลที่ทำมุมปะทะและความสูงที่มีค่ามากกว่าจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าความเสียดทานมากกว่าปีก สามเหลี่ยม 5 คู่ ชี้ตามทิศทางในการไหลที่ทำมุมปะทะและค่าความสูงต่ำกว่า และการใช้ครีบบร่วมกับปีกที่ผิวบน-ล่างจัดวางครีบบในแนวตรงกัน ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานเพิ่มมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งครีบบที่ผิวบน-ล่างวางตำแหน่งแบบเอียงกันและติดตั้งครีบบผิวบนหรือผิวล่างเพียงอย่างเดียว

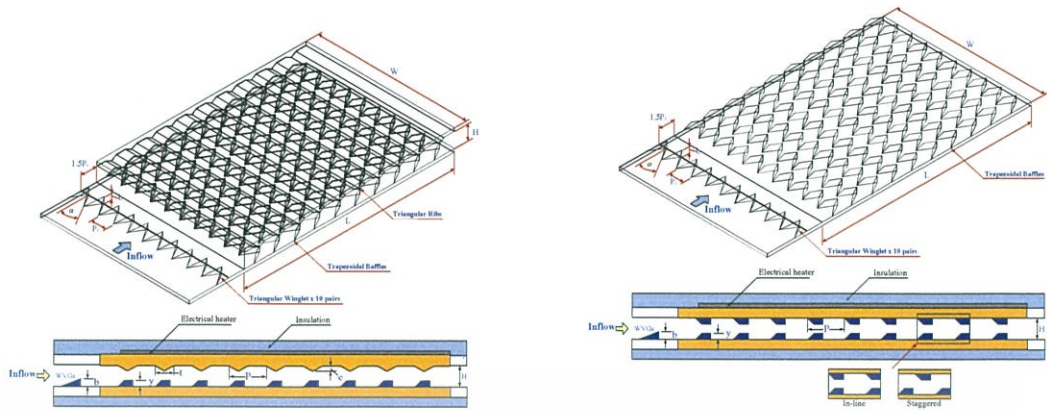


(ก) ครีบบหน้า



(ข) ครีบบหน้าติดตั้งผิวบนด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ครีบนานา ครีบบางสี่เหลี่ยมคางหมูและปีก

(ง) ครีบบางสี่เหลี่ยมคางหมู และปีก

รูปที่ 2.16 แผ่นทดสอบของ ชมภูคำ [25]

Han and Zhang [26] นำเสนอการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้ครีบทั้งหมด 7 รูปทรงของครีบที่วางเว้นช่วง พบว่าครีบรูปตัววีที่ทำมุม 60° แบบวางเว้นช่วงให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบผิวเรียบ 4.5 เท่า และดีกว่าครีบที่วางต่อเนื่อง ในการทดลองทั้งหมดได้ทำการติดตั้งครีบที่ผนังสองด้านและค่าความสูงของครีบต่อความสูงของท่อเท่ากับ 0.0625 และระยะพิตช์ต่อความสูงของครีบเท่ากับ 10, ต่อมา

Rau et al. [27] นำเสนอการกระจายการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งใด ๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดครีบบนผนังหนึ่งด้าน โดยเปลี่ยนอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงของครีบ และใช้วิธี Liquid crystal thermography ในการหาค่าสนามอุณหภูมิที่ตำแหน่งใด ๆ โดยที่อัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงของครีบที่ใช้ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 6, 8, 9, 10, 12, 14 และ 16 อัตราส่วนความสูงของครีบต่อความสูงของท่อใช้ค่าเดียวซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดที่อัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงของครีบเท่ากับ 9 และ 12, ต่อมา

Gao and Sunden [28] ได้ทำการวัดลักษณะของการไหลในช่องขนานที่ติดครีบตัววีมีทิศทางเดียวกับทิศการไหล และ ครีบตัววีมีทิศทางสวนกับการไหล โดยใช้ laser doppler velocimetry และ smoke visualization ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อน และค่าความดันตกคร่อม จากผลการทดลองพบว่า ครีบรูปตัววีที่ทิศทางสวนกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทาน และการเพิ่มสมรรถนะความร้อนมากกว่าเมื่อติดตั้งทิศทางเดียวกับการไหล

Murata and Mochizuki [29] ทำการศึกษาเชิงตัวเลขการกระจายการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสติดครีบ ใช้วิธีจำลอง large eddy โดยครีบทำมุม 60° ที่อัตราส่วนความสูงของครีบต่อความสูงของท่อเท่ากับ 0.1 และอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงของครีบเท่ากับ 10 จากการคำนวณเชิงตัวเลขสังเกตว่าการไหลมีจุดกระแทกที่ผนังจะอยู่ตรงกลางระหว่างครีบ ส่งผลให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่จุดใด ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chandra et al. [30] วัดอัตราการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดตั้งครีบบางขวางแบบต่อเนื่อง ที่ผนัง 1, 2, 3 และ 4 ด้าน ความยาวท่อต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ 20 ครีบบที่ติดบนผนังมีอัตราส่วนความสูงของครีบบต่อความสูงของท่อเท่ากับ 0.0625 และอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงของครีบบเท่ากับ 8 เขาพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนของผนังที่ติดครีบบ เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนลดลง แต่อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น

2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย

จากการศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในช่องขนานแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส จากงานวิจัยต่างๆที่ศึกษามาจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนรูปทรง, ระยะพิตช์และความสูงครีบบ, โครงสร้างครีบบแบบต่าง ๆ นั้นล้วนมีผลต่อสมรรถนะความร้อน ซึ่งในการศึกษานี้จะนำแนวคิดต่างๆในการประยุกต์ครีบบและตัวสร้างการหมุนควงตามแนวยาวมาติดตั้งในท่อ โดยพิจารณา ชนิด, รูปทรง, ขนาด, มุมและระยะพิตช์ของแผ่นครีบบ ที่จะส่งผลต่อการไหลของของไหลภายในท่อ การสูญเสียความดันและแรงเสียดทานเพื่อควบคุมกลไกการไหลในท่อ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าทดลองที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานที่มีครีบบด้วยตัวสร้างการหมุนควงตามแนวยาว เพื่อศึกษาหาวิธีการที่ดีที่สุดและเหมาะสมในการเพิ่มสมรรถนะความร้อน เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมกับสถานการณ์และพัฒนาเทคโนโลยีให้มีความเหมาะสมกับปัจจุบันให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น ดังเช่น การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเพื่อลดการสูญเสียพลังงานอย่างเปล่าประโยชน์ หากเราสามารถออกแบบและทำการพัฒนาให้ดีขึ้นได้ก็จะมีส่วนช่วยในการใช้พลังงานและทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและเป็นการช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรงอีกด้วย

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการ การถ่ายเทความร้อน โดยนำความรู้เกี่ยวกับ ทฤษฎีการพาความร้อนแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อ (Forced convection for flow inside ducts) มาใช้เป็นแนวทางในการอธิบายกลศาสตร์การไหล ซึ่งมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ สมดุลพลังงาน การถ่ายเทความร้อน สหสัมพันธ์การพาความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดัน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน (Thermal performance enhancement factor, TEF) โดยที่ทำการวิจัยที่กำลังขับเคลื่อน

3.2 กลศาสตร์ของไหล

พฤติกรรมการไหลในท่อมักมีขอบเขตจำกัด โดยตามทฤษฎีนั้นความหนาของชั้นขอบเขตการไหลนั้นจะไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ได้ เนื่องจากเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งชั้นขอบเขตการไหลก็จะก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดท่อทำให้ไม่สามารถขยายออกไปได้อีก และความเร็วจะมีลักษณะรูปร่างที่ชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งการไหลลักษณะ เรียกว่า การไหลแบบปรับตัวเต็มที่ (Fully developed flow) ส่วนการไหลก่อนหน้าที่จะเป็นลักษณะการไหลแบบปรับตัวเต็มที่ เรียกว่า การไหลที่กำลังปรับตัว (Developing flow) และจะเรียกช่วงระยะของลักษณะการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region

ความดันตกคร่อมมีผลกับกำลังงานของพัดลมโดยตรง ยิ่งมีความดันตกคร่อมมากยิ่งส่งผลให้ต้องใช้กำลังขับเคลื่อนของไหลมากขึ้น

ความดันตกคร่อมของของไหล, Δp

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

(3.1)

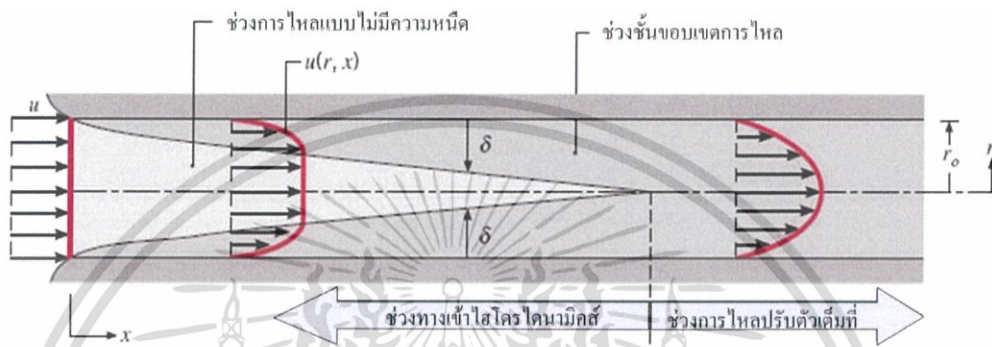
การจ่ายกำลังให้พัดลม, \dot{W}_{in}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.2.1 สภาวะการไหล

พิจารณการไหลแบบราบเรียบในท่อกลมที่มีรัศมี r_0 ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การก่อตัวของชั้นขอบเขตการไหลของการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม [35]

สำหรับการไหลภายในท่อนั้นต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (Entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นการไหลแบบใดระหว่างการไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลภายในท่อกลมกำหนดเป็น

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

เมื่อ u_m คือ ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.2.2 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่ การเกิดความดันตกคร่อมในการไหลภายในท่อนั้นเกี่ยวข้องกับการหาขนาดกำลังงานของปั๊มโดยตรง โดยในการหาความดันตกคร่อม สามารถหาได้โดยใช้ตัวประกอบเสียดทานของ Moody โดยนิยามว่า

$$f = \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2/2} \quad (3.6)$$

ค่านี้ต่างกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน C_f โดยนิยามว่า

$$C_f = \frac{\tau_s}{\rho u_m^2/2} \quad (3.7)$$

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

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (3.8)$$

ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่ คือ

$$f = \frac{64}{\text{Re}_D} \quad (3.9)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่นั้นจะมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ที่ยุ้งยากมากกว่า โดยจำเป็นต้องใช้ผลจากการทดลองตัวประกอบเสียดทานในแต่ละค่าเลขเรย์โนลด์ ซึ่งจะแสดงในไดอะแกรมของ Moody ในรูปที่ 3.3 ค่าตัวประกอบเสียดทานนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์และ

สภาวะผิวของท่อ สำหรับผิวเรียบจะมีค่าน้อยมากและจะเพิ่มขึ้นที่ความหยาบของผิวเพิ่มขึ้นนิยามได้ดังนี้

$$f = 0.316\text{Re}_D^{-1/4} \quad \text{Re}_D < 2 \times 10^4 \quad (3.10)$$

$$f = 0.184\text{Re}_D^{-1/5} \quad \text{Re}_D > 2 \times 10^4 \quad (3.11)$$

สำหรับความดันตกคร่อม (Δp) ระหว่างระยะ x_1 ถึง x_2 เป็น

$$\Delta p = -\int_{p_1}^{p_2} dp = f \frac{\rho u_m^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx = f \frac{\rho u_m^2}{2D} (x_2 - x_1) \quad (3.12)$$

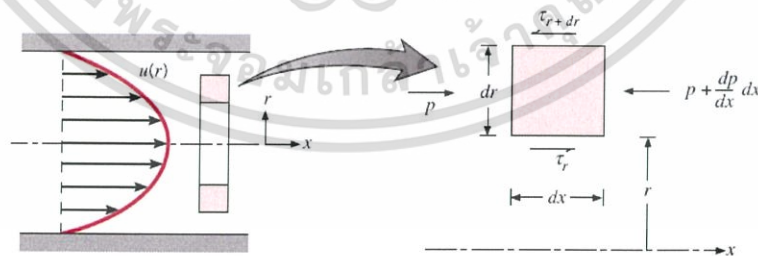
ค่า f หาได้จากรูปที่ 3.3 หรือจากสมการ (3.9) สำหรับการไหลแบบราบเรียบ และจากสมการ (3.10) และ (3.11) สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมผิวเรียบ

3.2.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที

ลักษณะรูปร่างของความเร็วจะสามารถหาได้ ที่การไหลแบบราบเรียบของของไหลที่มีคุณสมบัติคงที่ และอัดตัวไม่ได้ ในช่วงที่ปรับตัวเต็มทีของท่อกลม (สำหรับการไหลปั่นป่วน 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 สมดุลแรงบนอิลิเมนต์ดิฟเฟอเรนเชียล สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ก่อตัวเต็มทีในท่อกลม [35]

สำหรับอิลิเมนต์ดิฟเฟอเรนเชียลรูปวงแหวนแสดงในรูปที่ 3.2 สามารถเขียนสมดุลของแรงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 & -\tau_r(2\pi r dx) + \left\{ \tau_r(2\pi r dx) + \frac{d}{dr}[\tau_r(2\pi r dx)]dr \right\} \\
 & + p(2\pi r dr) - \left\{ p(2\pi r dr) + \frac{d}{dx}[p(2\pi r dr)]dx \right\} = 0
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\text{ซึ่งลดรูปเป็น} \quad -\frac{d}{dr}(r\tau_r) = r \frac{dp}{dx} \tag{3.14}$$

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

$$\text{ดังนั้น (3.14) จะเป็น} \quad \frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} \tag{3.15}$$

เพราะว่า dp/dx นั้นไม่ขึ้นกับ r ดังนั้นเราสามารถอินทิเกรต (3.15) ได้

$$r \frac{du}{dr} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) \frac{r^2}{2} + C_1 \tag{3.16}$$

$$\text{และ} \quad u(r) = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) \frac{r^2}{4} + C_1 \ln r + C_2 \tag{3.17}$$

จากเงื่อนไขที่ขอบ ได้ว่า $u(r_0) = 0$ และ $\partial u / \partial r|_{r=0} = 0$ จะได้

$$u(r) = -\frac{1}{4\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) r_0^2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \tag{3.18}$$

ดังนั้นรูปทรงของความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที จะเป็นพาราโบลา และสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน (dp/dx) ต้องเป็นลบเสมอ

ผลลัพธ์ที่กล่าวมานี้อาจใช้หาค่าความเร็วเฉลี่ยได้ (u_m) โดยแทนสมการ (3.18) แล้วอินทิเกรต จะได้

$$u_m = -\frac{r_0^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} \tag{3.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (3.16) ใน (3.15) จะได้รูปร่างของความเร็วเป็น

$$\frac{u(r)}{u_m} = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (3.20)$$

เพราะว่า u_m สามารถหาได้จากการรู้อัตราการไหลของมวล ดังนั้นสมการ (3.19) สามารถใช้หาเกรเดียนต์ของความดันได้ (dp/dx)

3.2.4 ความเร็วเฉลี่ย

ความเร็วภายในท่อตลอดทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อจะใช้ความเร็วเฉลี่ย u_m แทน ความเร็วเฉลี่ย คือ ความหนาแน่นของของไหลคูณด้วยความเร็วและพื้นที่หน้าตัดของท่อ จะมีค่าเท่ากับอัตราการไหลของมวลที่ไหลภายในท่อ

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \quad (3.21)$$

การไหลในสภาวะคงที่ ที่อัดตัวไม่ได้ภายในท่อและมีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ค่า \dot{m} และ u_m ย่อมมีค่าคงที่ตลอดความยาวท่อ

สำหรับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($A_c = D_h^2$) ค่าของเลขเรย์โนลด์ส์รูปเป็น

$$Re_D = \frac{\dot{m} D_h}{A_c \mu} \quad (3.22)$$

เพราะว่าค่า \dot{m} อาจสามารถหาได้จากการอินทิเกรตของฟลักซ์มวล (ρu) ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c \quad (3.23)$$

ดังนั้น สำหรับท่อกลม กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ จะได้

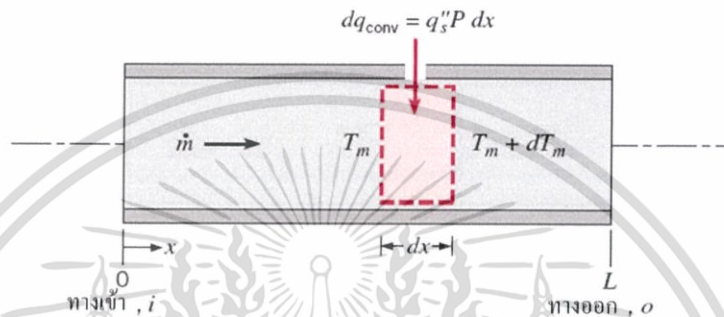
$$u_m = \frac{\int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c}{\rho A_c} = \frac{2\pi\rho}{\rho\pi r_0^2} \int_0^{r_0} u(r, x) r dr = \frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} u(r, x) r dr \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.3 การสมดุลของพลังงาน

พิจารณาการไหลในท่อตามรูปที่ 3.5 ของไหลเคลื่อนที่ด้วยอัตรามวลคงที่ \dot{m} และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ของของไหล และการนำความร้อนในทิศตามแนวแกนจะไม่นำมาคิด ดังนั้นถ้าไม่มีงานเพลากระทำโดยของไหลขณะที่ไหลผ่านท่อ จะมีเพียงการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและงานจากการไหลเท่านั้น



รูปที่ 3.3 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ [35]

งานของการไหลเป็นงานที่ใช้เคลื่อนที่ของไหลผ่านปริมาตรควบคุม คิดต่อหน่วยมวลของไหล จะอยู่ในรูปของผลคูณความดัน p และปริมาตรจำเพาะ v (ซึ่ง $v = 1/\rho$)

โดยการประยุกต์ใช้การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 3.5 และจากนิยามของ T_m จะได้

$$dq_{\text{conv}} + \dot{m}(c_v T_m + pv) - \left[\dot{m}(c_v T_m + pv) + \dot{m} \frac{d(c_v T_m + pv)}{dx} dx \right] = 0 \quad (3.25)$$

$$\text{หรือ} \quad dq_{\text{conv}} = \dot{m} d(c_v T_m + pv) \quad (3.26)$$

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

$$dq_{\text{conv}} = \dot{m} c_p dT_m \quad (3.27)$$

สมการนี้ใช้สำหรับของเหลวที่อัดตัวไม่ได้ ในกรณีนี้ $c_v = c_p$ เพราะ v น้อยมาก ๆ $d(pv)$ โดยทั่วไปจะน้อยกว่า $d(c_v T_m)$ มากจนตัดทิ้งได้เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปของสมการ (3.27) เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขสำหรับท่อทั้งหมด โดยการอินทิเกรตจากทางเข้าของท่อจนถึงทางออก จะได้

$$q_{\text{conv}} = \dot{m}c_p(T_{m,o} - T_{m,i}) \quad (3.28)$$

โดยที่ q_{conv} เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h

$$h = \frac{\dot{m}C_p(T_{m,o} - T_{m,i})}{A_s(T_s - T_b)} \quad (3.29)$$

อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, T_b

$$T_b = \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \quad (3.30)$$

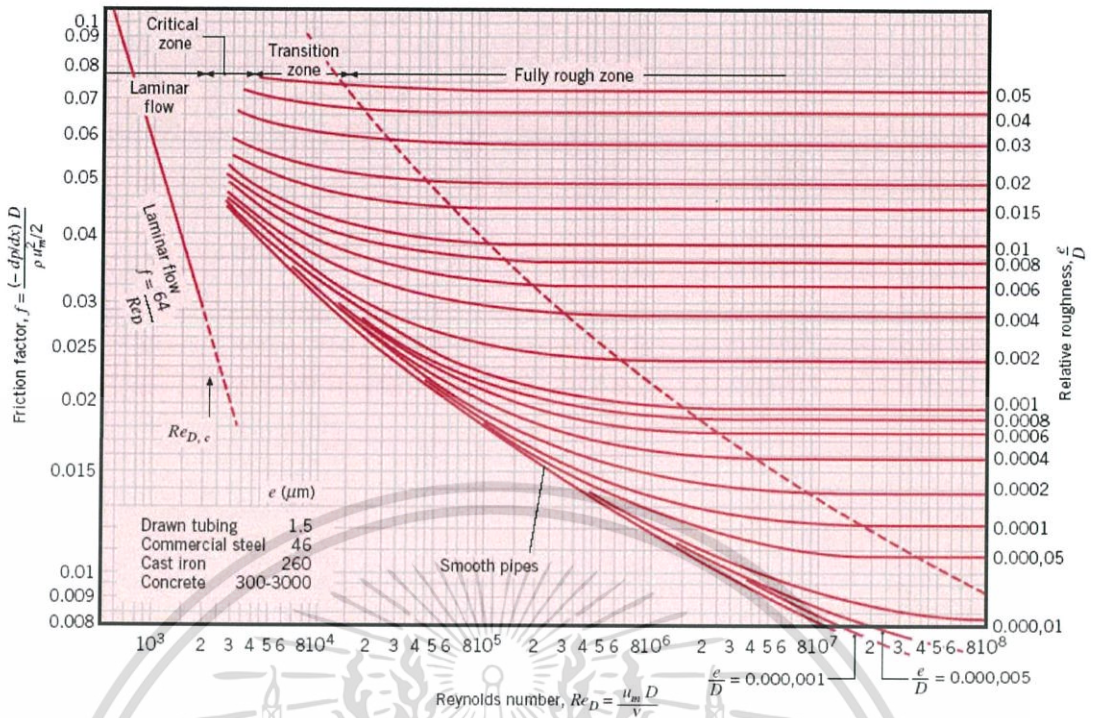
เลขนัสเซิลท์, Nu_D

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \quad (3.31)$$

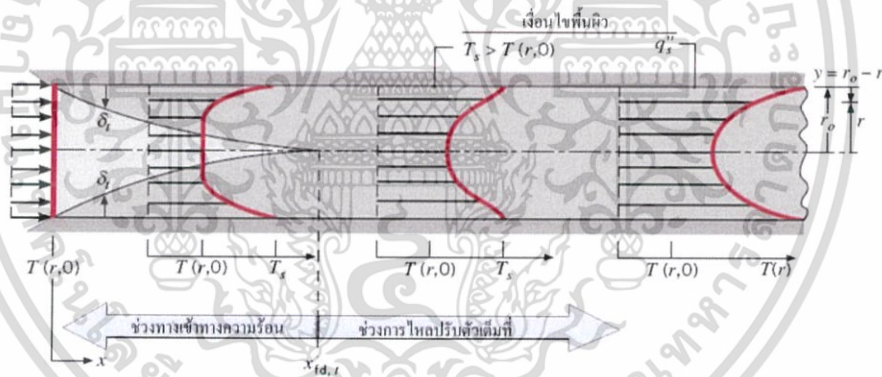
เงื่อนไขความร้อนที่ผิว คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ที่ผิวครึ่ง

3.4 การถ่ายเทความร้อน

การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม แสดงในรูปที่ 3.4 ที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ $T(r,0)$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิว จะส่งผลให้การพาความร้อนเกิดขึ้นและชั้นขอบเขตการไหลของความร้อนจะเริ่มต้นก่อตัวขึ้น ที่สภาวะที่ผิวของท่อคงที่ โดยอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอคงที่ ($T_s = \text{คงที่}$) หรือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ ($q_s'' = \text{คงที่}$) ก็จะทำให้เกิดสภาวะที่ปรับตัวคงที่ของความร้อน (Thermally fully developed condition) ในที่สุดลักษณะของอุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่ก็จะแตกต่างกันออกไปตามเงื่อนไขไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่



รูปที่ 3.4 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่ในท่อกลม [35]



รูปที่ 3.5 การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม [35]

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัว

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D} \right)_{\text{lam}} \approx 0.05 Re_D Pr \tag{3.32}$$

สำหรับการเปรียบเทียบของอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้า (Entrance region) ตามสมการ (3.32) กับสมการของความเร็ว (3.4) นั้นจะเห็นได้ว่าต่างกันที่ค่า Pr เท่านั้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ถ้า $Pr > 1$ ไฮโดรไดนามิกส์ชั้นขอบเขตมีการไหลขยายเร็วกว่าชั้นขอบเขตการไหลของความร้อนมาก ($x_{fd} > x_{fd,t}$) และจะกลับกันถ้า $Pr < 1$ สำหรับค่า Pr สูง ๆ เช่น น้ำมัน ($Pr \geq 100$) x_{fd} จะน้อยกว่า $x_{fd,t}$ มาก และจึงสมมุติได้ว่าลักษณะของความเร็วที่ปรับตัวเต็มที่ นั้นมีตลอดช่วงบริเวณทางเข้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความร้อน ในทางตรงกันข้ามของไหลที่มีค่า Pr ต่ำมาก ๆ เช่น โลหะเหลว ($Pr \leq 0.05$) อุณหภูมิมีลักษณะเป็นแบบปรับตัวเต็มที่ได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ลักษณะของความเร็วยังอยู่ในช่วงที่กำลังก่อตัวอยู่ ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วนเงื่อนไขทั้งสองแทบจะไม่ขึ้นกับ Pr และสามารถประมาณได้ว่า $x_{fdt}/D = 10$

3.4.1 อุณหภูมิเฉลี่ย

อุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณ จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) โดยให้ความหมายได้ดังสมการ (3.33)

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho u c_v T dA_c}{m c_v} \quad (3.33)$$

ค่า T_m จะเปลี่ยนแปลงตามแนวแกน x ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหล ซึ่งต่างจาก u_m ที่มีค่าคงที่ สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

ค่าฟลักซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่ตำแหน่งใด ๆ หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.34)$$

ค่า h เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใด ๆ T_m จะเปลี่ยนแปลงตามทิศทาง นั่นคือ dT_m/dx จะไม่เป็นศูนย์ ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น

3.5 สหสัมพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบราบเรียบในท่อกลม

ในบริเวณที่ปรับตัวเต็มที่ ณ ตำแหน่งที่จุดใด ๆ ในท่อ สมการพลังงานจะเป็น

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.35)$$

พจน์ทางด้านซ้ายมือของสมการ (3.35) เป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการพา และพจน์ทางขวาด้านมือเป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการนำ ในทิศทางตามแนวรัศมี

คำตอบของสมการ (3.35) ได้หาไว้แล้วสำหรับช่วงที่มีการปรับตัวเต็มที่ ในช่วงนี้การประมาณชั้นขอบเขตการไหลของความเร็วเป็นที่พอใจ คือ $v = 0$ และ $(\partial u / \partial x) = 0$ สำหรับกรณีของรูปร่างความเร็วตามแนวแกนเป็นรูปแบบพาราโบลา นอกจากนี้แล้วสำหรับกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ การประมาณชั้นขอบเขตการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลอุณหภูมิให้ผลเป็นที่พอใจด้วย นั่นคือ $\partial^2 T / \partial x^2 = 0$ แทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวแกนและความเร็วตามแนวแกน สมการพลังงาน (3.36) ลดรูปเป็น

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rdT/dr) = \frac{2u_m}{\alpha} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \left[1 - (r/r_0)^2 \right] \quad q_s'' = \text{คงที่} \quad (3.36)$$

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

$$T(r) = \frac{2u_m}{\alpha} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \left[\frac{r^2}{4} - \frac{r^4}{16r_0^2} \right] + C_1 \ln r + C_2 \quad (3.37)$$

ค่าคงที่จากการอินทิเกรต C_1 และ C_2 หาได้จากเงื่อนไขดังนี้

T ที่ $r = 0$ หรือ $(\partial T / \partial r = 0$ ที่ $r = 0)$ จะได้ $C_1 = 0$ และ $T(r_0) = T_s$ ที่ซึ่ง T_s แปรตามแกน x จะได้ $C_2 = T_s - (2u_m/\alpha)(dT_m/dx)(3r_0^2/16)$ ดังนั้นสำหรับในช่วงปรับตัวเต็มที่และฟังก์ชันความร้อนที่ผิวคงที่จะได้การกระจายของอุณหภูมิในรูป

$$T(r) = T_s - \frac{2u_m r_0^2}{\alpha} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \left[\frac{3}{16} + \frac{1}{16} \left(\frac{r}{r_0} \right)^4 - \frac{1}{4} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (3.38)$$

เมื่อได้การกระจายของอุณหภูมิ ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ก็สามารถหาได้ เช่น ถ้ารู้รูปร่างของความเร็วและอุณหภูมิตามสมการ (3.15) และ (3.38) โดยแทนในสมการ (3.26) และอินทิเกรตทั่วทั้ง r จะได้

$$T_m = T_s - \frac{11}{48} \left(\frac{u_m r_0^2}{\alpha} \right) \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \quad (3.39)$$

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

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

$$T_m - T_s = - \frac{11}{48} \frac{q_s'' D}{k} \quad (3.40)$$

จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน จะได้ว่า

$$h = \frac{48}{11} \left(\frac{k}{D} \right) \quad (3.41)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในท่อที่มีคุณลักษณะพลั๊กซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ การไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่ ค่าเลขนัสเซิลท์จะคงที่ ไม่ขึ้นกับ Re_D , Pr และตำแหน่งตามแกน x

3.6 สหสัมพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม

สมการที่ใช้ในการหา Nu_x สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่ในท่อกลมเรียบ เสนอโดย Colburn ซึ่งได้มาจาก Chilton-Colburn analogy [35]

$$\frac{C_f}{2} = \frac{f}{8} = StPr^{2/3} = \frac{Nu_D}{Re_D Pr} \quad (3.42)$$

แทนค่า f จากสมการ (3.23) ลงในสมการของ Colburn เป็น

$$Nu_D = 0.023Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \quad (3.43)$$

Dittus-Boelter [35] ได้เสนอสมการเป็น

$$Nu_D = 0.023Re_D^{4/5} Pr^n \quad (3.44)$$

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

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

สมการนี้ได้รับการยืนยันจากผลทดลองสำหรับเงื่อนไขดังนี้

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

สมการต่าง ๆ นี้จะสามารถใช้เฉพาะกรณีย่อย ๆ ที่ความต่างอุณหภูมิ ($T_s - T_m$) ไม่มากนัก โดยที่ คุณสมบัติต่าง ๆ คัด T_m สำหรับการไหลที่แสดงลักษณะในการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติมาก ๆ Seider และ Tate [35] แนะนำให้ใช้สมการต่อไปนี้

$$Nu_D = 0.027Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (3.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ











$$\left[\begin{array}{l} 6,000 \leq Re_D \leq 10^7 \\ 0.7 \leq Pr \leq 10,000 \\ L/D \geq 60 \end{array} \right]$$

โดยคุณสมบัติต่าง ๆ ยกเว้นค่า μ_s หาที่ T_m โดยที่ μ_s หาที่ T_w

3.7 สหสัมพันธ์การพาความร้อน สำหรับท่อที่ไม่กลม

เนื่องจากว่ามีข้อจำกัดในการพิจารณาการไหลภายในท่อกลม การประยุกต์ทางด้านวิศวกรรมส่วนใหญ่ เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนในท่อที่ไม่กลม โดยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลเป็นความยาวเฉพาะ (Characteristic length) เรียกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

ตารางที่ 3.1 ค่า Nu_D สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่ในท่อพื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ กัน [35]

หน้าตัดขวาง	$\frac{b}{a}$	$Nu_D = \frac{hD_h}{k}$		$f Re_{D_h}$
		(Uniform q_s')	(Uniform T_s)	
	—	4.36	3.66	64
	1.0	3.61	2.98	57
	1.43	3.73	3.08	59
	2.0	4.12	3.39	62
	3.0	4.79	3.96	69
	4.0	5.33	4.44	73
	8.0	6.49	5.60	82
	∞	8.23	7.54	96
	∞	5.39	4.86	96
	—	3.11	2.49	53

เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter), D_h

$$D_h = \frac{4A_c}{P_c} \quad (3.46)$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัด

P_c คือ เส้นรอบรูปของหน้าตัดการไหล

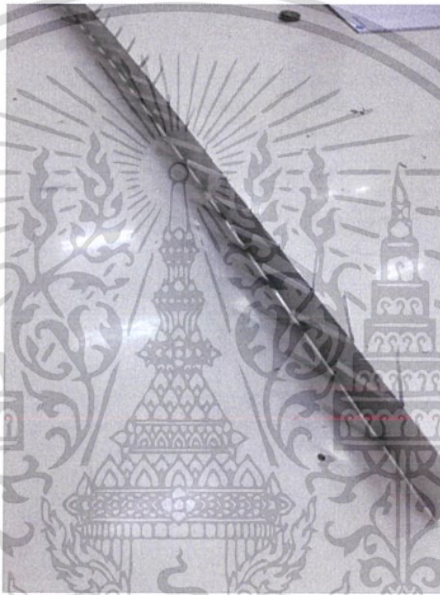
เส้นผ่านศูนย์กลางนี้ใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น Re_D และ Nu_D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ค่า Nu_D ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ปรับตัวเต็มที่ได้จากตารางที่ 3.1

3.8 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Enhancement) โดยการทำให้เกิดการหมุนวน โดยการใส่แผ่นขนานติดครีบริบรูปตัววีด้านบนและด้านล่างตามรูปที่ 3.6 ทำให้ความเร็วของการไหลเพิ่ม เนื่องจากความเร็วสัมผัสเพิ่มใกล้เคียงท่อ การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดความดันตกคร่อม (Pressure drop) มากขึ้น



รูปที่ 3.6 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการติดแผ่นติดครีบริบรูปตัววีด้านบนและด้านล่าง

บทที่ 4

การออกแบบอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเหลี่ยมที่มีการติดตั้งปีกหนา รายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ตลอดจนวิธีการทดลองในแต่ละขั้นตอน การเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยแบ่งส่วนในการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อโดยการศึกษารามิเตอร์ต่างๆ ของปีกหนาแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักดังนี้

4.1.1 มุมปะทะของปีกหนา

4.1.2 อัตราส่วนความสูงของปีกหนา

4.1.3 ระยะพิตช์

จากนั้นกล่าวถึงสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อเหลี่ยม โดยการถ่ายเทความร้อนในพจน์ของเลขนัสเซลท์(Nusselt Number)และการสูญเสียความดันในพจน์ของตัวประกอบเสียดทาน จากนั้นทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อ แบบผิวเรียบและแบบมีตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน โดยวิเคราะห์ที่กำลังขับเดียวกัน

4.2 การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลอง

4.2.1 พัดลม

การเลือกใช้ขนาดพัดลม โดยพิจารณาที่เลขเรย์โนลด์ $Re=29000$ ซึ่งเป็นจุดที่พัดลมรับภาระงานสูงสุด

จากตารางคุณสมบัติอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 318 K จะได้ $\rho=1.099712 \text{ kg/m}^3$ และ $\mu=191.3993 \times 10^{-7}$

จากสมการ Reynold number

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

เมื่อ u_m คือ ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการอัตราการไหล

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

4.2.2 ท่อทางเข้าชุดทดลอง

สำหรับการไหลภายในท่อนั้นต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (Entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นการไหลแบบใดระหว่างการไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลภายในท่อกลมกำหนดเป็น

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} X_{fd} &= 50D \\ &= 50 \times 0.045 \\ &= 2.25 \text{ m} \end{aligned}$$

ดังนั้น จึงกำหนดให้ทางเข้าชุดทดลองมีความยาว 2.3 เมตร

ในการทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบ่งเป็นขั้นตอนได้ 3 ขั้นตอนดังนี้

- 1.เตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง
- 2.ติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง
- 3.ทดลองและเก็บผลการทดลอง

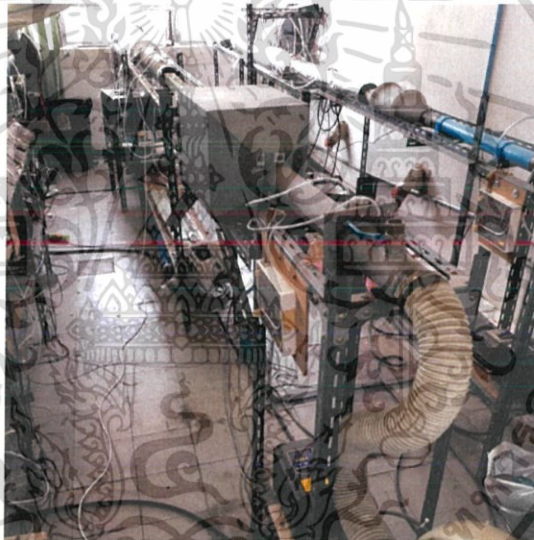
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ผลของความสูงปีกหนาระยะพิตซ์ รูปแบบการจัดวางปีกหนภายในท่อ ซึ่งเป็นงานวิจัยเชิงการทดลองที่มีการจัดเตรียมและสร้างอุปกรณ์ในการทดลองโดยรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังต่อไปนี้

4.3.1 ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเหลี่ยม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อโดยใช้ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อสี่เหลี่ยมและถ่ายเทความร้อนภายในท่อเหลี่ยมด้วยปีกหนการติดตั้งปีกหนมาโดยการสอดใส่ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเหลี่ยม

ชิ้นงานทดลองมีความสูงของแผ่นเพลตที่ 45 มิลลิเมตร ท่อยาวทั้งหมด 3.5 เมตร ผนังชุดทดลองประกอบด้วยฉนวน 3 ชั้น ฉนวนชั้นแรกใช้เป็นฉนวนใยแก้ว ฉนวนชั้นที่สองเป็นฉนวนใยแก้ว และชั้นที่สามหุ้มด้วยฉนวนที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศ

4.3.2 แหล่งจ่ายอากาศ

ใช้พัดลมเป็นแหล่งจ่ายอากาศเป็นพัดลมแบบหอยโข่งแรงดันสูง(High Pressure blower) โดยเลือกใช้ VENZ TYPE TEFC FRAME 90L ขนาด 1.5 kW หรือ 2 Hp ความดัน 6 kPa ที่ 3000 RPM แสดงในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แหล่งจ่ายอากาศ

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) รุ่น ND 1 Series เป็นอินเวอร์เตอร์สำหรับปรับความถี่ (frequency Inverter) ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของพัดลม เพื่อให้ควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้ตามที่กำหนดแสดงในรูปที่ 4.3



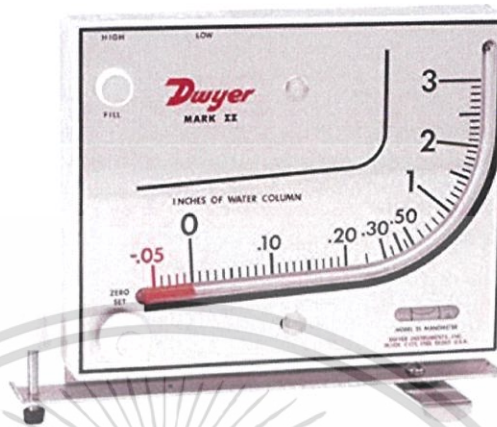
รูปที่ 4.3 อินเวอร์เตอร์ (Inverter) รุ่น ND 1 Series

4.3.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer) โดยเลือกใช้รุ่น Mark 2 Model No.25 เพื่อใช้วัดความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าท่อและด้านหลังท่อชุดการทดลอง ใช้หา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลของอากาศและความแตกต่างของความดันโดยจะสามารถอ่านค่าความแตกต่างของระดับได้จาก red gage oil แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

4.3.4 ถังพักลม(Setting tank)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปรับสภาพการไหลของอากาศเพื่อลดความปั่นป่วนของการไหลให้น้อยลงที่สุดก่อนเข้าสู่ท่อแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ถังพักลม(Setting tank)

4.3.5 อุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิ

โดยใช้อุปกรณ์เก็บข้อมูล(Recorder) รุ่น Fluke 2608A ใช้ในการส่งผลข้อมูลอุณหภูมิทั้ง 24 จุดไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ได้ทำการลงโปรแกรมไว้ โดยเชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิลด้านบน 11 จุด ด้านข้าง 11 จุด และที่บริเวณทางเข้าทางออกอีกอย่างละ 1 จุด ดังแสดงในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิ

เทอร์โมคัปเปิล(Thermocouple)เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิโดยเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบชนิด K จำนวนทั้งหมด 28 ตัว โดยทางเข้าและทางออกเป็นชนิด RTD Pt100 จำนวน 2 ตัว

4.3.6 เครื่องวัดความดันตกคร่อม

เครื่องมือวัดความดันตกคร่อม(Differential Pressure gages) รุ่น Dwyer 475 Mark III โดยมีช่วงการใช้งาน 0-10.00 IN W.C.(0-2.49 kPa) เพื่อใช้ในการวัดความดันตกคร่อมระหว่างส่วนทดสอบ ดังรูปที่ 4.7

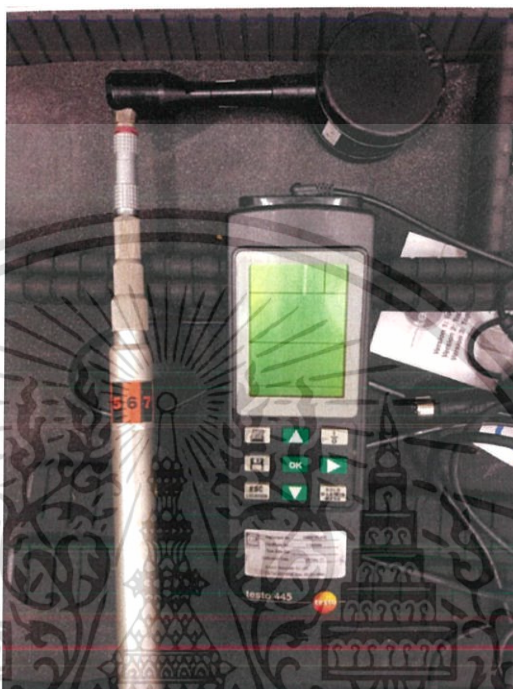


รูปที่ 4.7 เครื่องวัดความดันตกคร่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.7 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ

โดยเครื่องมือวัดความเร็วของอากาศ(Vane-type Anemometer) รุ่น 445 ยี่ห้อ TESTO ใช้ในการวัดความเร็วลมที่ตำแหน่งทางออกของชุดทดลอง ใช้ในการสอบเทียบความเร็วลมในขณะทำการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ

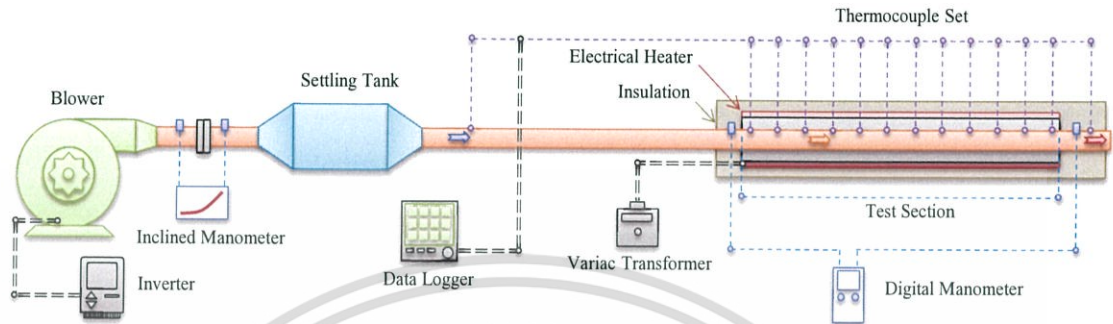
4.4 อุปกรณ์การทดลอง

ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจตุรัสที่มีการติดตั้งปีกหนา โดยใช้อากาศเป็นของไหลในการทดสอบโดยอากาศถูกส่งเข้าช่วงการทดลองด้วยพัดลมความดันสูง (High Pressure blower) ขนาด 1.5 kW โดยมีอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ใช้ปรับความเร็วรอบของพัดลมเพื่อให้ได้ค่าตามที่กำหนดและอัตราการไหลของอากาศสามารถวัดได้ด้วย เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer)

โครงสร้างของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความสูง 45 มิลลิเมตรโดยปีกหนาทำจากอลูมิเนียมและทำการวัดอุณหภูมิที่ส่วนทดสอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 24 ตัวติดตั้งไว้ ณ ตำแหน่งด้านบนและด้านข้างอย่างละ 11 ตัว ที่ทางเข้าและทางออกอีกอย่างละ 1 ตัว โดยค่าอุณหภูมิจะถูกอ่านค่าโดย Data logger โดยค่าอุณหภูมิทั้งหมดจะถูกอ่านค่าผ่าน data logger และส่งไปแสดงผลที่เครื่องคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ชุดทดลองจะมีจุดวัดความดันสถิต 2 จุดอยู่ด้านบนของท่อเพื่อวัดความดันตกคล่อมตามแนวยาวของส่วนทดสอบด้วยเครื่อง Digital differential PPressure เพื่อทำการหาค่าตัวประกอบเสียดทานและความดันตกคล่อม



อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีการติดปีกหน้าใช้ในการสอดใส่ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อโดยมีการติดปีกรูปตัววีทั้งหมด 2 แบบคือ

1. ปีกรูปตัววีแบบติดผนังท่อ



รูปที่ 4.9 ปีกรูปตัววีแบบติดผนังท่อ

2. ปีกรูปตัววีแบบไม่ติดผนังท่อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก่อนนำไปเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.10 ปีกรูปตัววีแบบไม่ติดผนังท่อ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ ด้วยพารามิเตอร์ของปีกหนา ดังนี้ มุมปะทะของปีกหนาเท่ากับ 60° ,อัตราส่วนความสูงของปีกหนา (BR) เท่ากับ 0.1 ,0.15 และ 0.2 ,ระยะพิตช์ (PR) เท่ากับ 1.0 ,1.5 และ 2.0

4.5 วิธีการทดลอง

พิจารณาผลของการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ติดครีบนารูปตัววี ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้อากาศเป็นของไหลให้ไหลผ่านแบบตรงมีพัดลมแรงดันสูงเป็นตัวขับ

1. ทำการติดตั้งครีบบิกหนาในส่วนทดสอบของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส
2. วัดค่าความดันตกคร่อม และบันทึกผล
3. ทำการเปิดสวิทซ์พัดลม เพื่อให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง และปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อให้พัดลมมีความเร็วรอบที่เหมาะสมให้ได้อัตราการไหลตามที่กำหนด
4. ทำการเปิดเครื่องจ่ายไฟกระแสสลับ ปรับค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟให้เหมาะสมเพื่อให้ความร้อนกับผิวท่อด้วยเงื่อนไขพลัสความร้อนคงที่
5. สังเกตอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ทั้ง 24 จุด ให้มีอุณหภูมิคงที่ และบันทึกผลของอุณหภูมิผิวส่วนทดสอบ อุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกส่วนทดสอบ
6. ปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่มความเร็วลมตามค่าที่กำหนดไว้ จนครบทั้งหมด ซึ่งมีค่าเรย์โนลด์อยู่ตั้งแต่ $Re = 4,000$ ถึง $29,000$
7. เปลี่ยนรูปแบบการวางปีกหนาในส่วนทดสอบของชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส แล้วดำเนินการในรูปแบบเดิม เพื่อเก็บค่าความดันตกคร่อมของส่วนทดสอบ อุณหภูมิผิวทดสอบ อุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกส่วนทดสอบ ตามค่าความเร็วลมที่กำหนด
8. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ค่าการถ่ายเทความร้อนอยู่ในรูปของเลขนัลเซิลท์ ค่าการสูญเสียความดันซึ่งอยู่ในรูปของตัวประกอบแรงเสียดทาน และค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 บทนำ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลการทดลองการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยการใส่ปีกเข้าไปในแนวระหว่างกลางของท่อ โดยติดปีกรูปตัววี เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปีกรูปตัววีที่มุมปะทะ ความสูงของปีกและระยะพิตช์ต่างๆ โดยแบ่งหัวข้อ ออกเป็นดังนี้

- (1) การทดลองโดยศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความสูงของปีกที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันที่ได้ในกรณีของอัตราส่วน ความสูงของปีกที่แตกต่างกัน
- (2) การทดลองโดยศึกษาอิทธิพลของระยะพิตช์ที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเท ความร้อนและการสูญเสียความดันที่ได้ในกรณีระยะพิตช์ที่แตกต่างกัน
- (3) ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในพจน์ของเลขนัสเซลท์ (Nu) และการสูญเสีย ความดันในพจน์ของตัวประกอบเสียดทาน (f) จากนั้นเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความดันกับผนังท่อเรียบ และค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) ซึ่งเป็นข้อมูลที่คำนวณที่กำลังขับเดียวกัน ดังต่อไปนี้

5.2 ผลการทดสอบท่อผนังเรียบ

การนำเสนอผลการศึกษาทดลองของการถ่ายเทความร้อนและคว้ความเสียดทานภายในท่อ เปลา่จะแสดงในเทอมตัวเลขนัสเซลท์และตัวประกอบความเสียดทาน ตามลำดับ เพื่อความน่าเชื่อถือ ของชุดทดสอบดังนั้นจึงทำการทดสอบท่อเปลา่และนำผลที่ได้เปรียบกับสหสัมพันธ์ โดยผลตัวเลข นัสเซลท์จากการทดลองได้นำไปเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ โดยผลตัวเลขนัสเซลท์จากการทดลองได้ นำไปเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ Gnielinski และสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ในขณะที่ค่าตัว ประกอบของความเสียดทานจะทำการเปรียบเทียบสหสัมพันธ์ของ Petukhov และสหสัมพันธ์ของ Blasius

สหสัมพันธ์ของ Gnielinski

$$Nu = [(f/8)(Re-1000)PR] / [1 + 12.7(f/8)^{1/2}(PR^{2/3}-1)] \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter

$$Nu_D = 0.023Re_D^{4/5}Pr^{0.4} \quad (5.2)$$

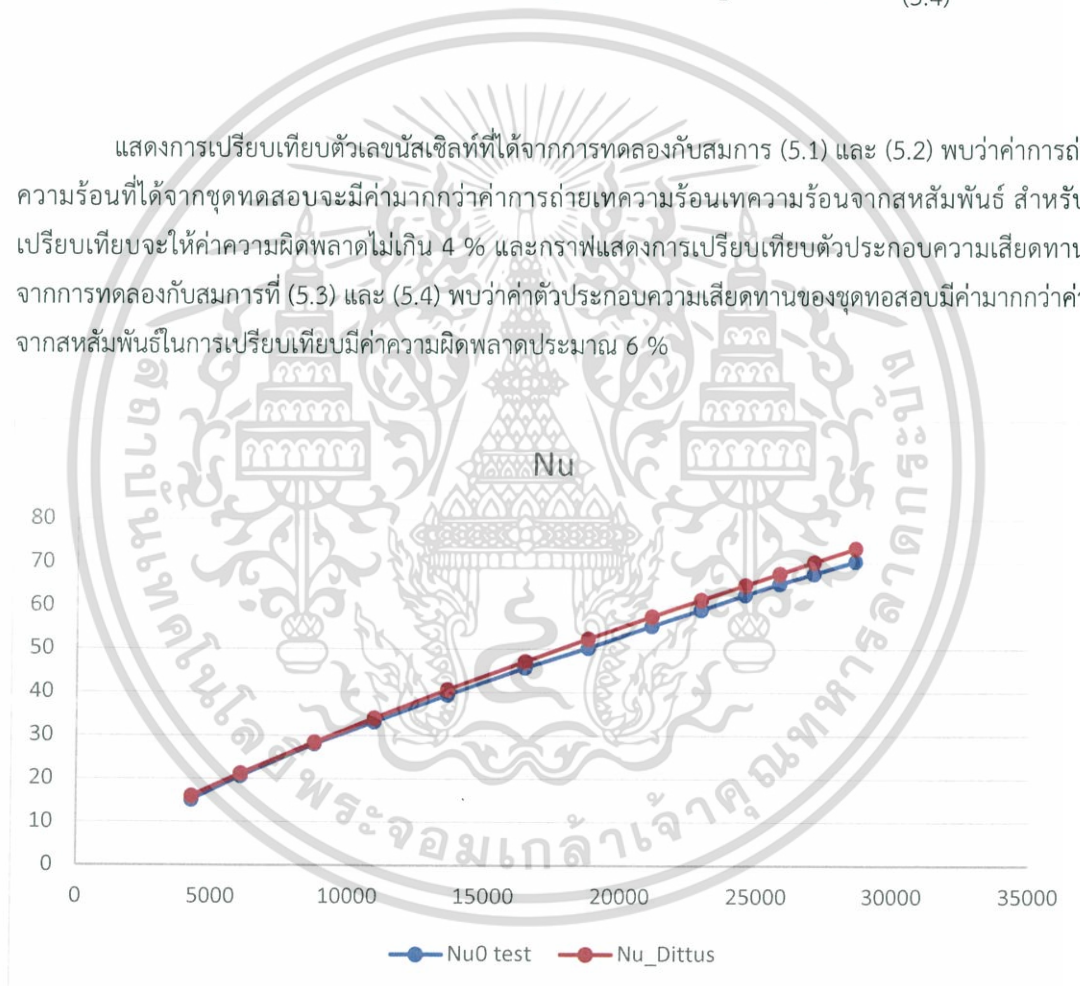
สหสัมพันธ์ของ Petukhov

$$f=(0.79\ln Re-1.64)^{-2} \quad (5.3)$$

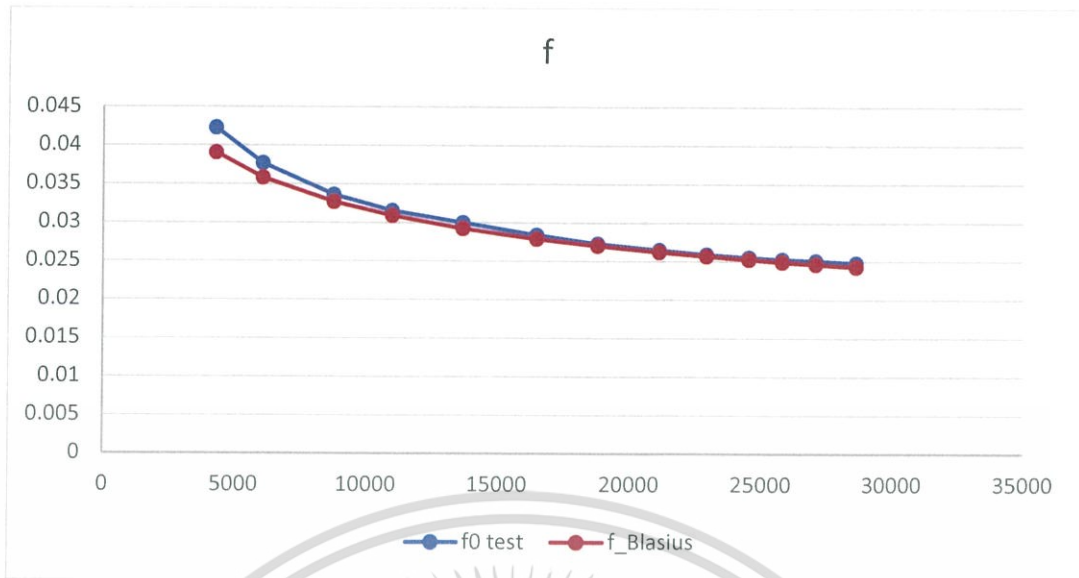
สหสัมพันธ์ของ Blasius

$$f = 0.316Re_D^{-1/4} \quad Re_D < 2 \times 10^4 \quad (5.4)$$

แสดงการเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซลที่ไดจากการทดลองกับสมการ (5.1) และ (5.2) พบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากชุดทดสอบจะมีค่ามากกว่าค่าการถ่ายเทความร้อนเทความร้อนจากสหสัมพันธ์ สำหรับการเปรียบเทียบจะให้ค่าความผิดพลาดไม่เกิน 4 % และกราฟแสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากการทดลองกับสมการที่ (5.3) และ (5.4) พบว่าค่าตัวประกอบความเสียดทานของชุดทดสอบมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากสหสัมพันธ์ในการเปรียบเทียบมีค่าความผิดพลาดประมาณ 6 %

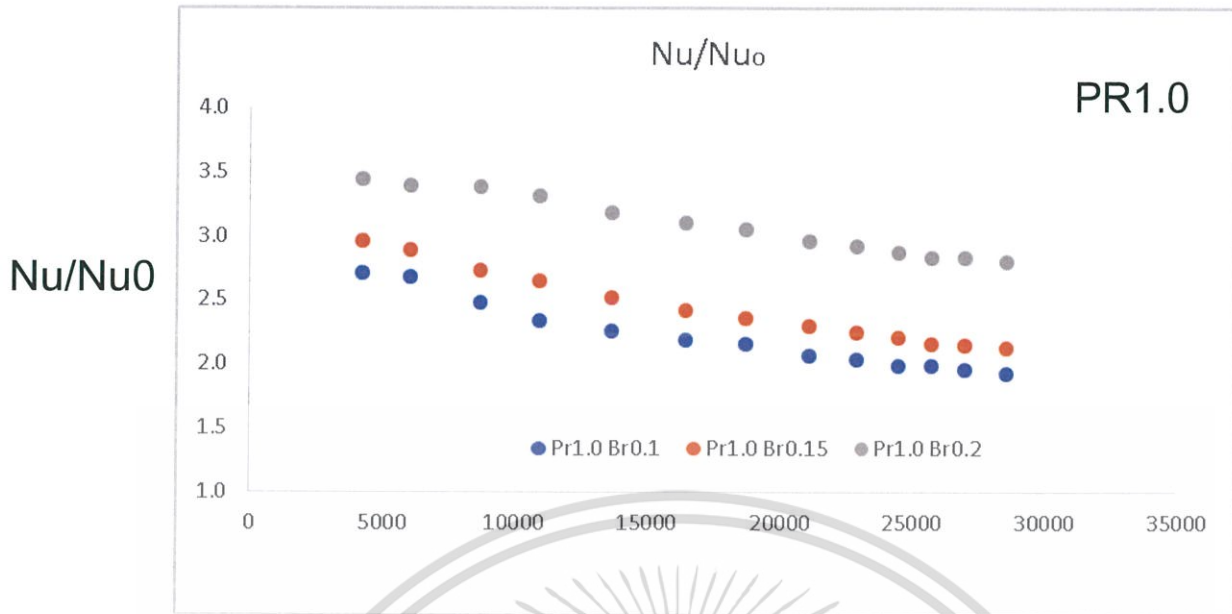


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

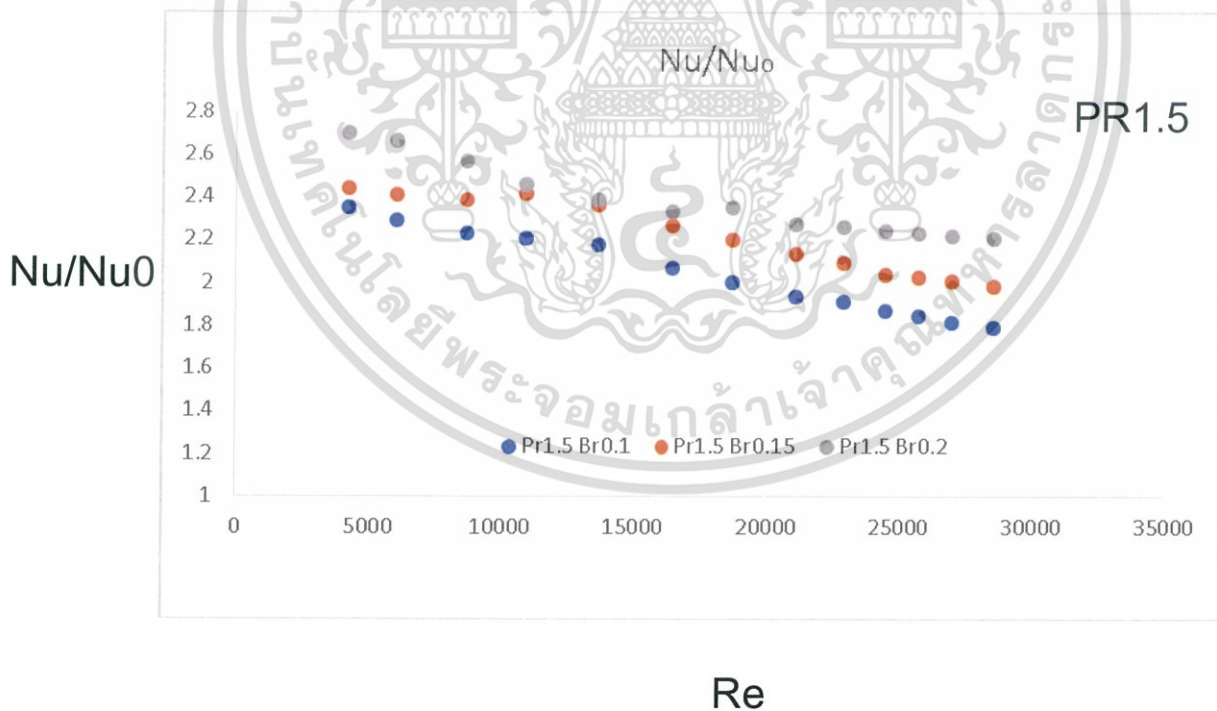


5.3 การทดลองโดยศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความสูงของปีกที่แตกต่างกัน

การเปรียบเทียบตัวเลขสัมประสิทธิ์ของกรณีการสอดใส่ปีกที่มีอัตราส่วนความสูงที่แตกต่างกัน ความสูงกับอัตราส่วนระยะพิตช์มีค่าเท่ากับ 0.5 , 1.0 และ 1.5 และวางเอียงมุมปะทะเท่ากับ 30° ตามลำดับพบว่ากรณีการสอดใส่ปีกที่มีอัตราส่วนสูงเท่ากับ 0.1 จะมีการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่า 0.15 และ 2.0 ตามลำดับ เนื่องจากอัตราส่วนความสูงของปีก จะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลทำงานถึงความรุนแรงของความปั่นป่วน โดยอัตราส่วนความสูงของปีกที่มีค่ามากกว่าจะขัดขวางการไหลได้ดีกว่าแต่ทั้งนี้ก็มีตัวประกอบแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นตามมาด้วยดังนั้นการใส่ปีกที่มีอัตราส่วนความสูงที่น้อยกว่าจะสามารถลดตัวประกอบแรงเสียดทานตรงนี้ได้ดีกว่าทำให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า

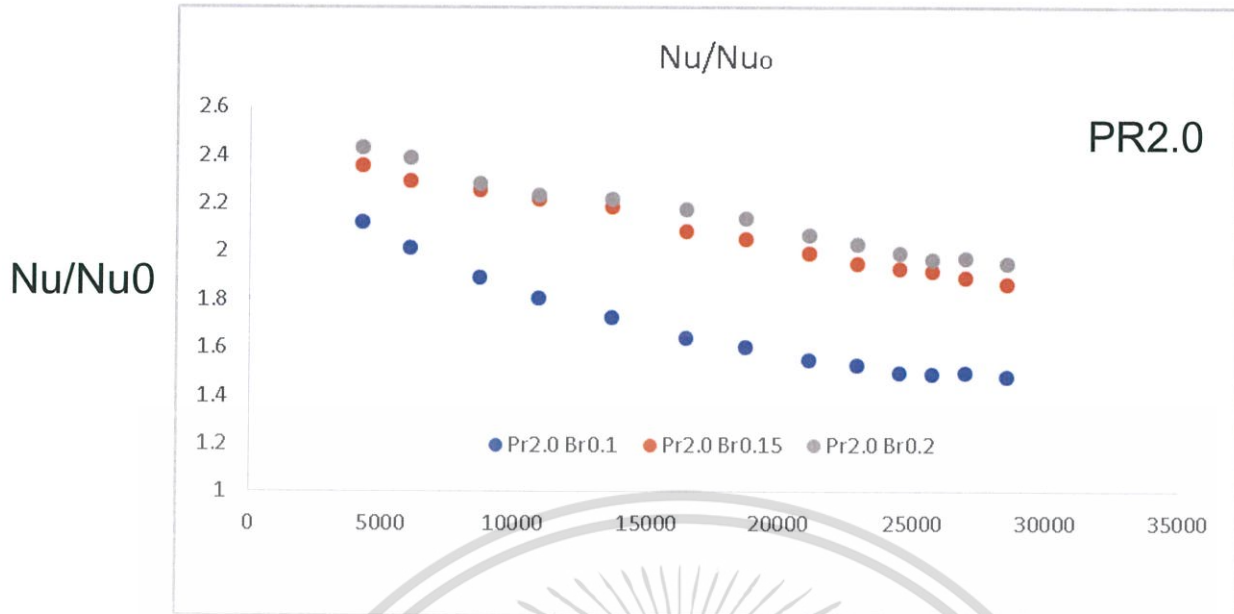


รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพล BR

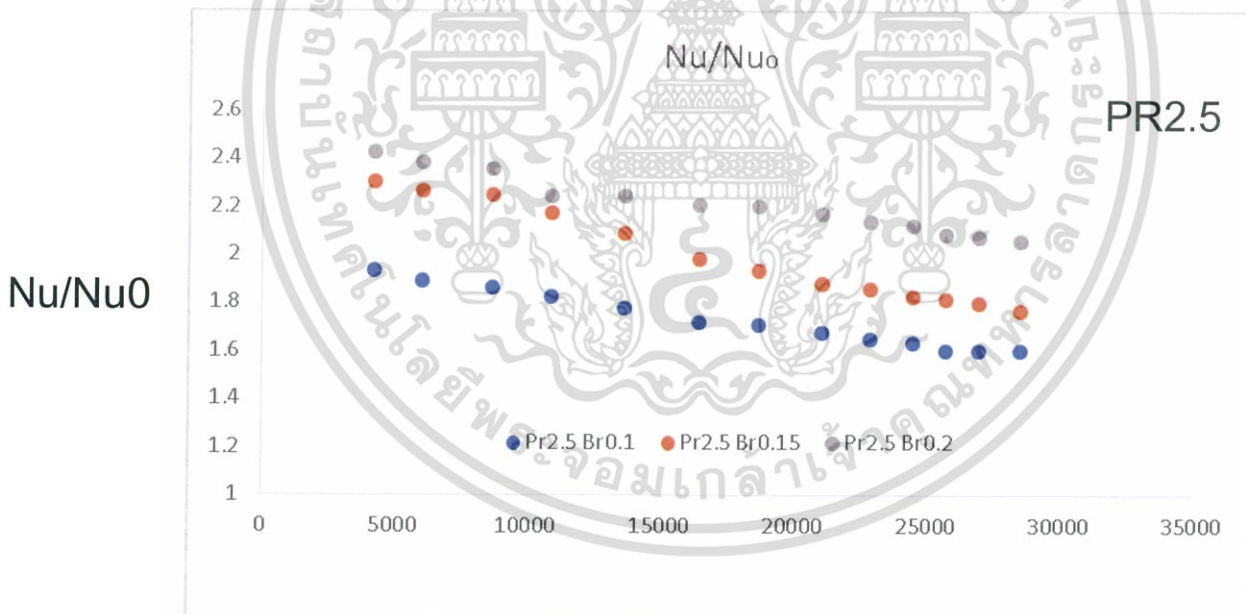


รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพล BR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

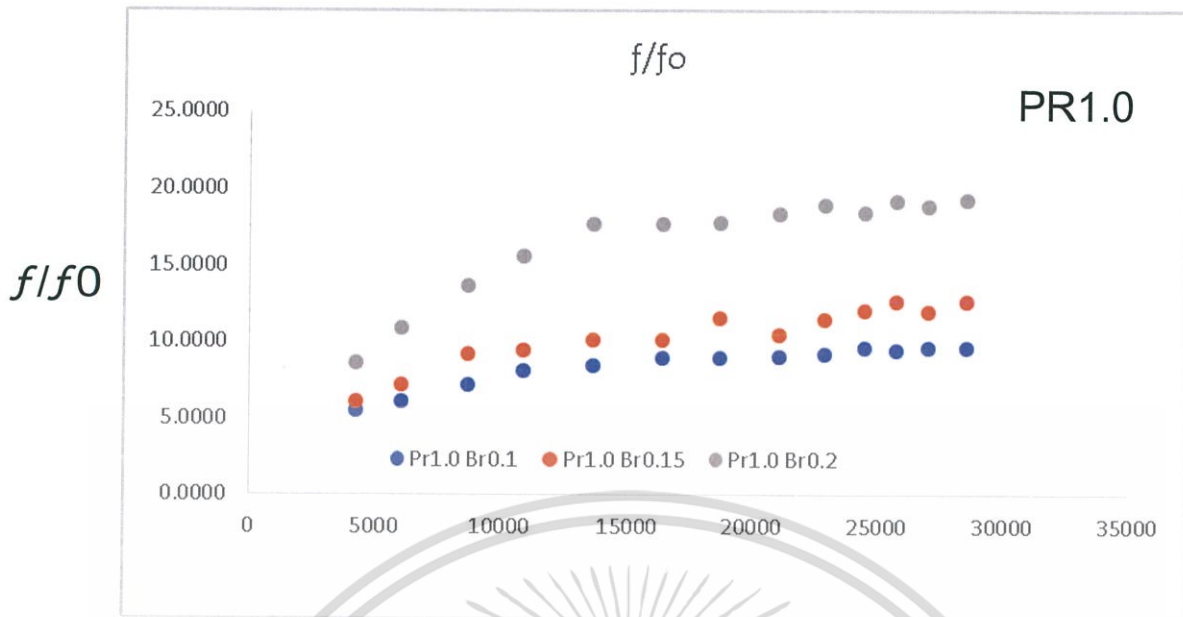


รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพล BR

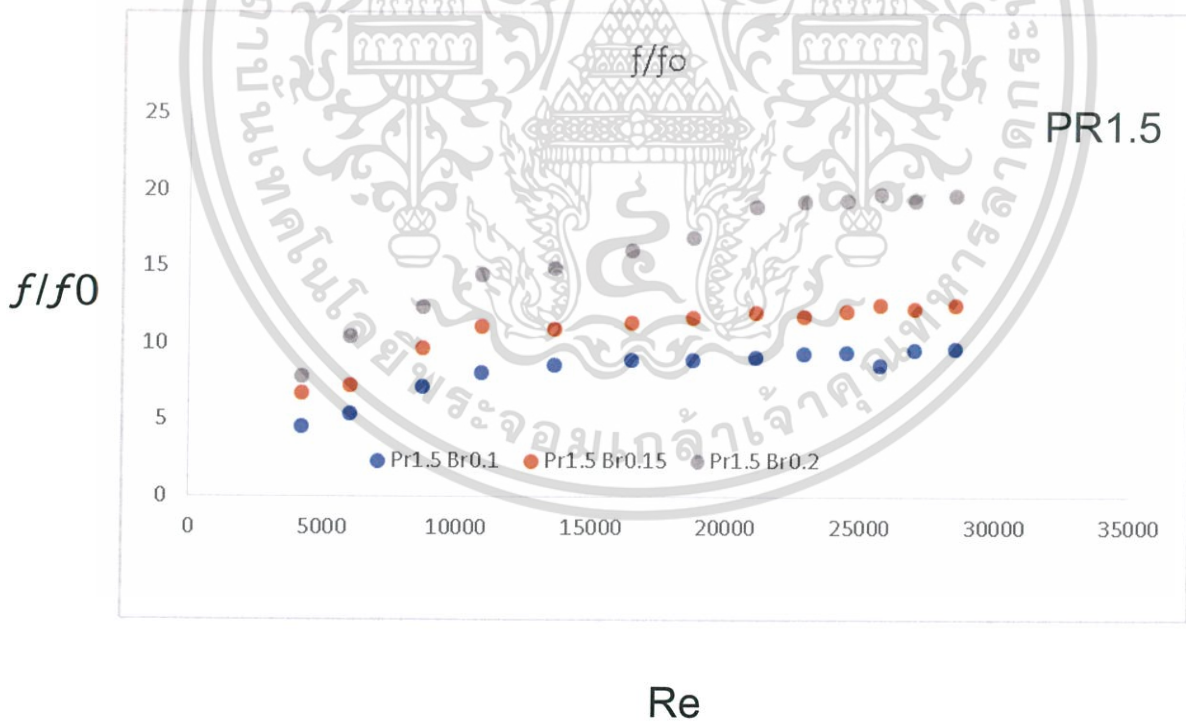


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพล BR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

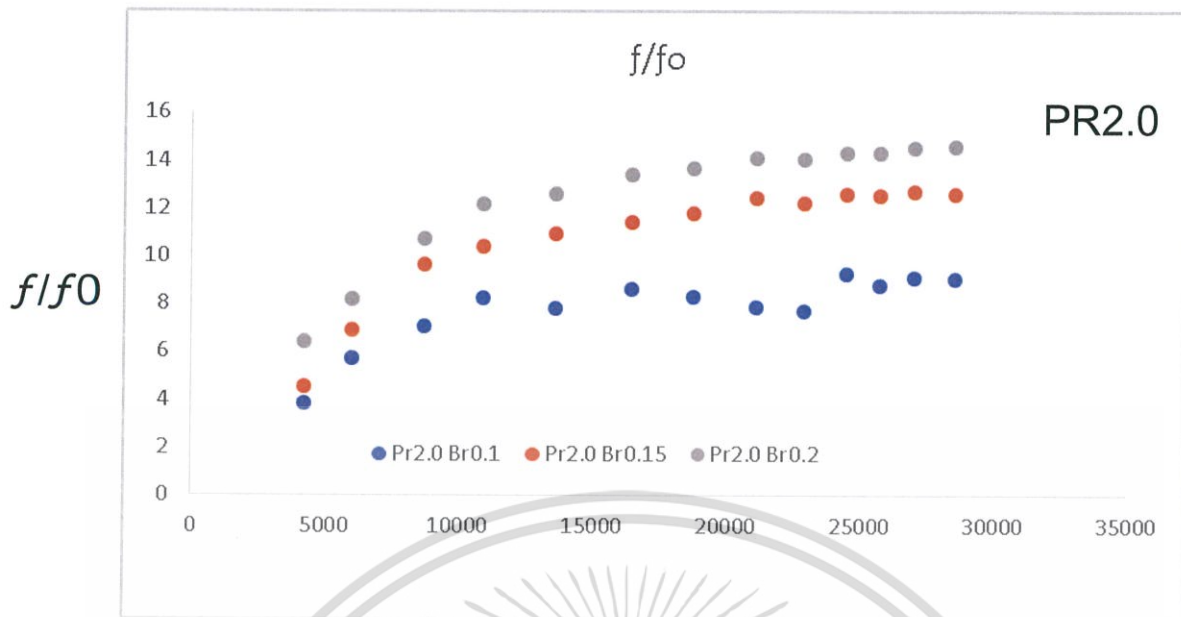


รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR

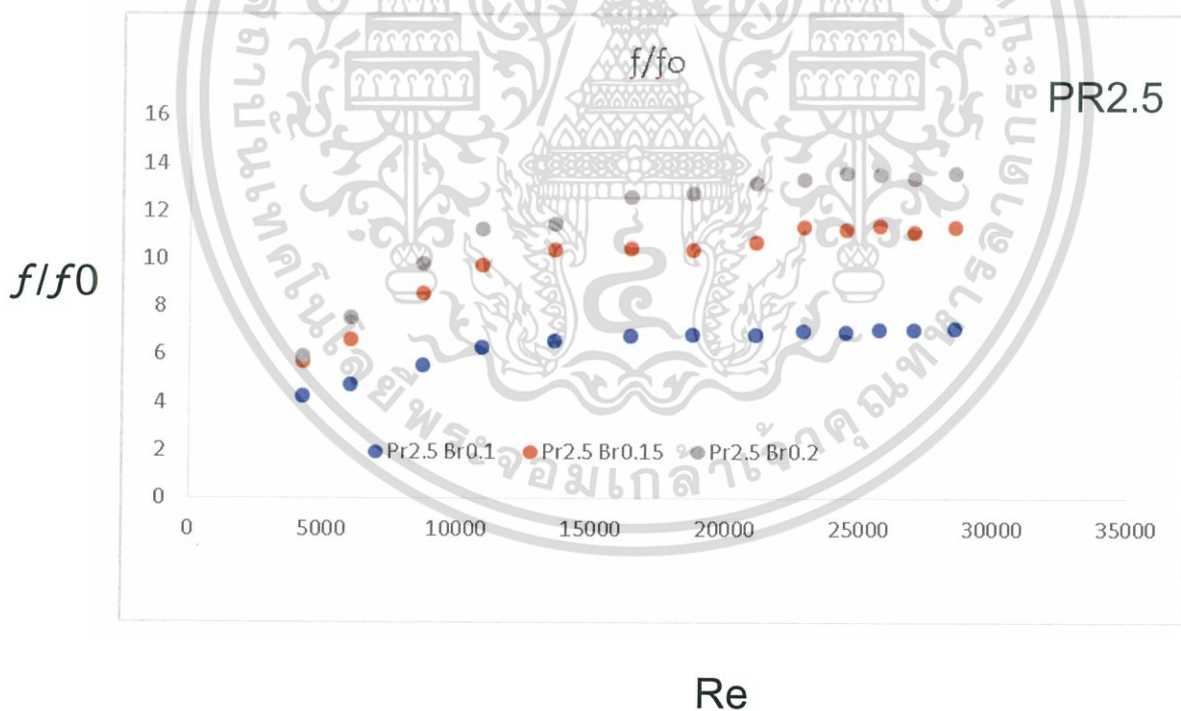


รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

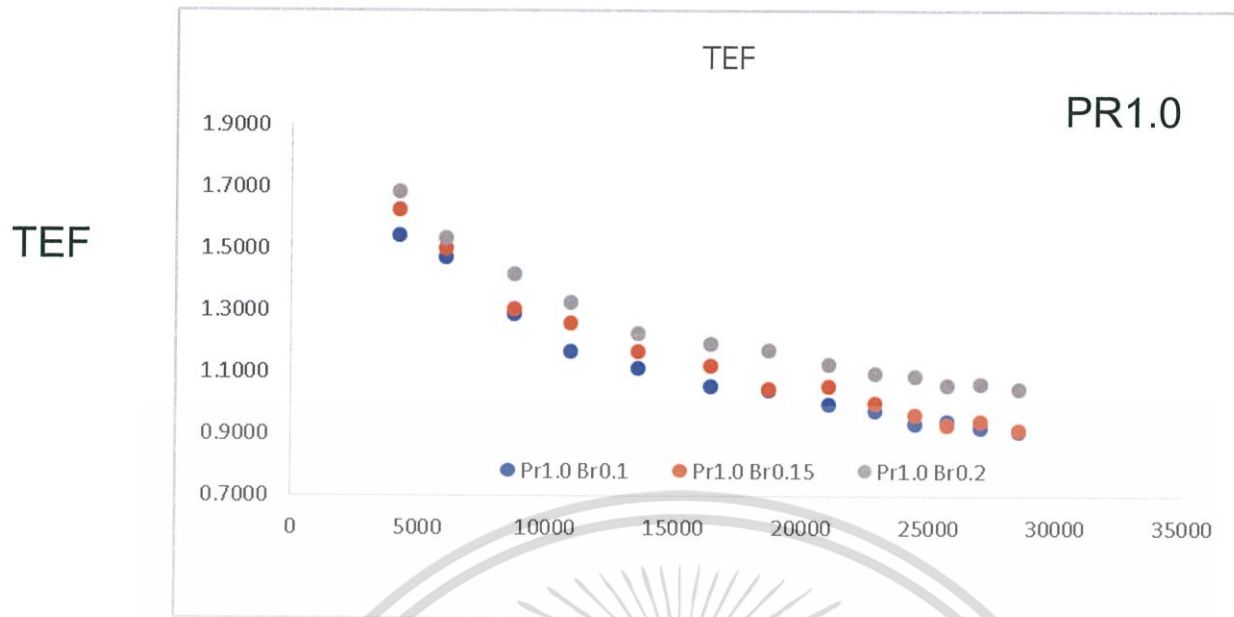


รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR

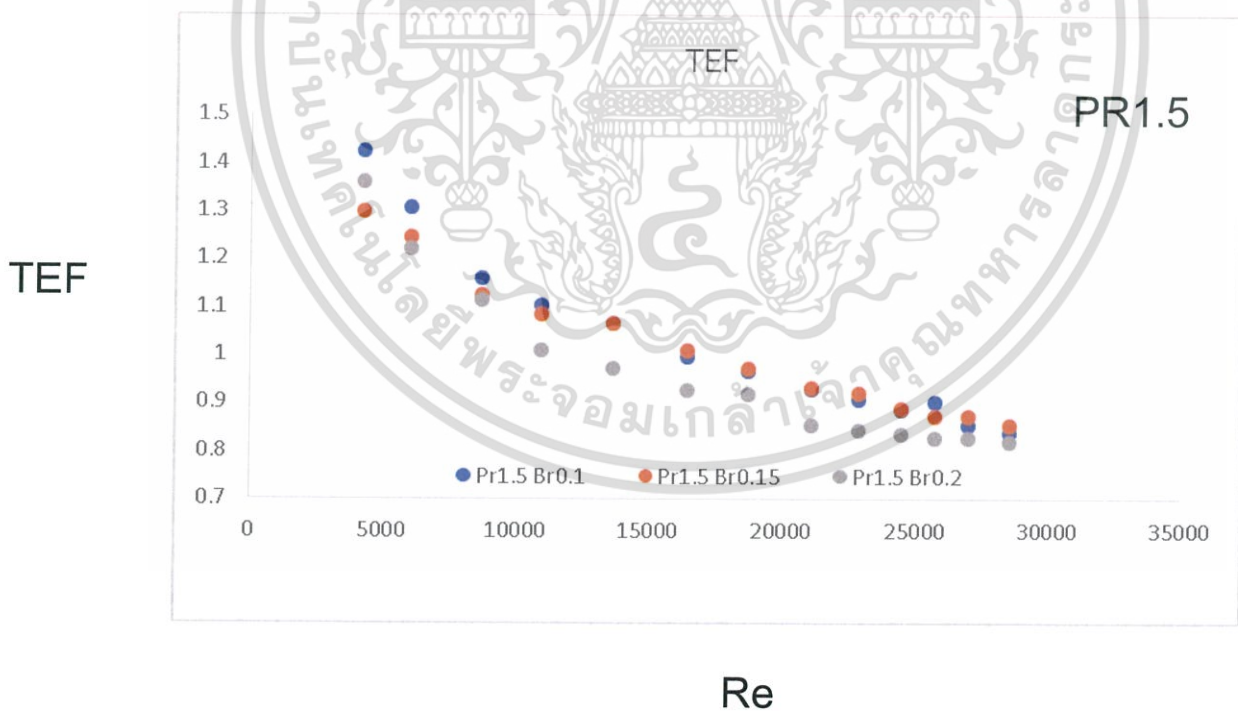


รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

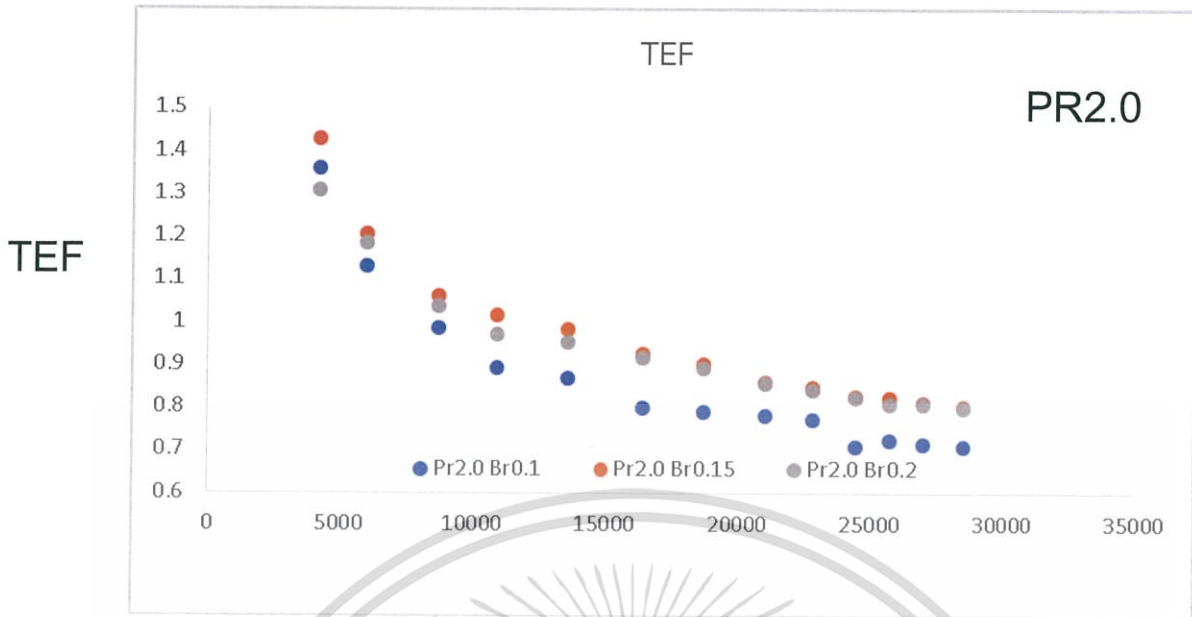


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน
ในการแสดงอิทธิพล BR

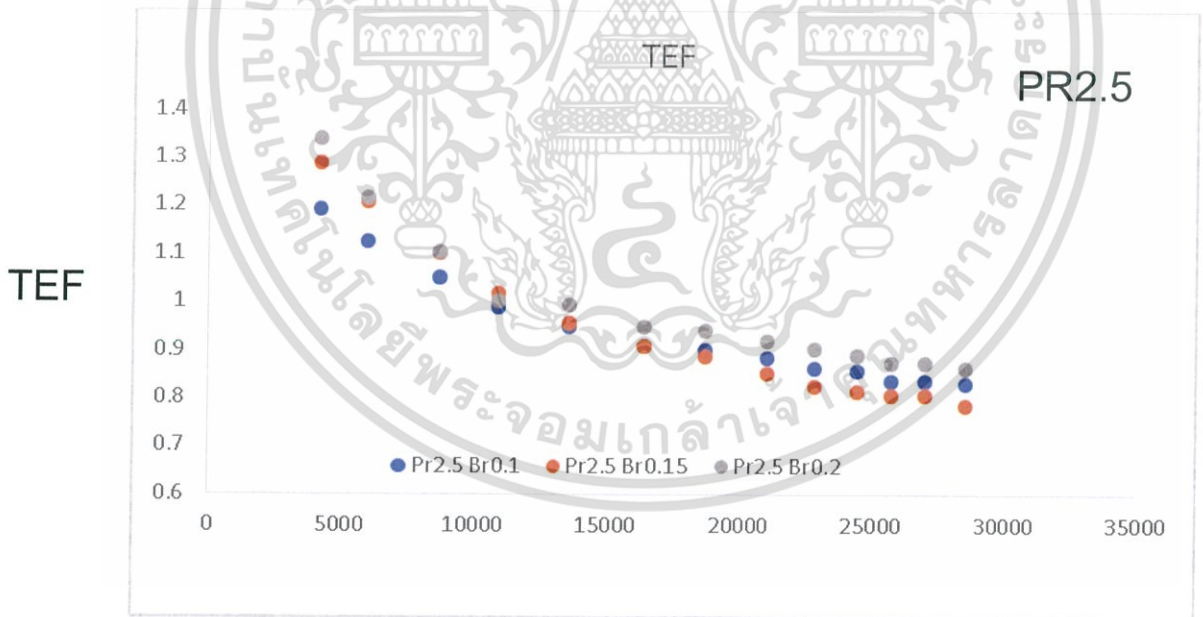


รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน
ในการแสดงอิทธิพล BR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในการแสดงอิทธิพล BR

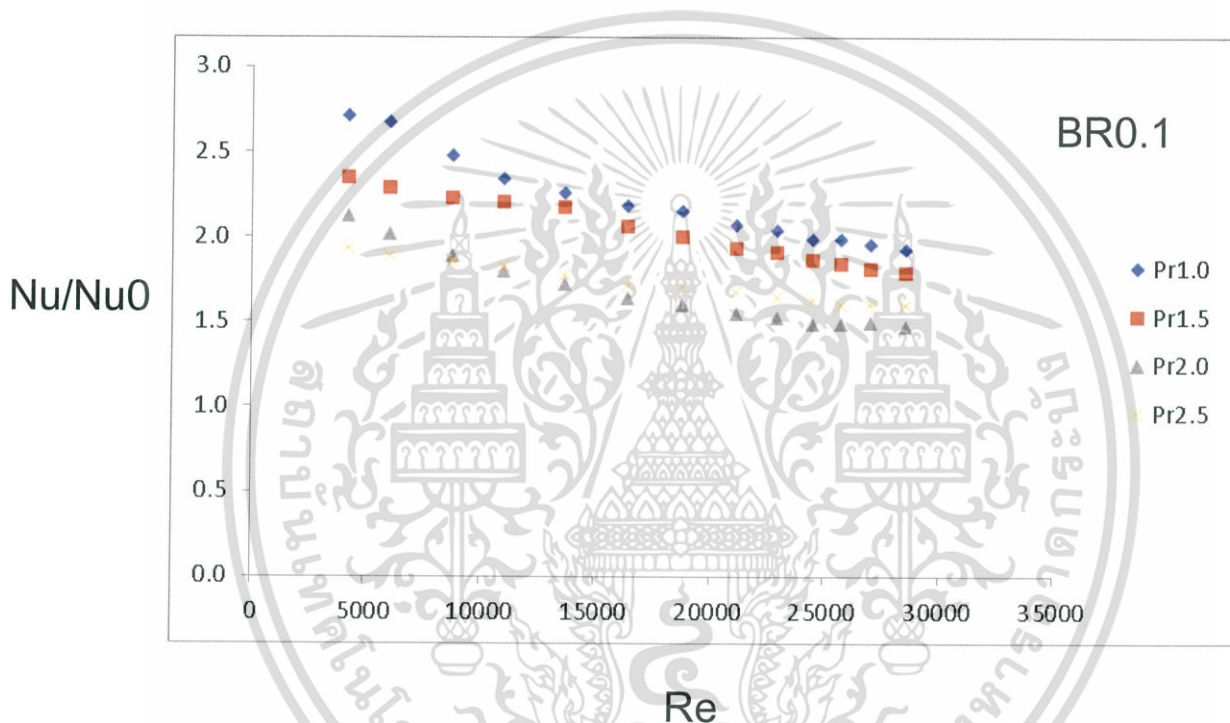


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในการแสดงอิทธิพล BR

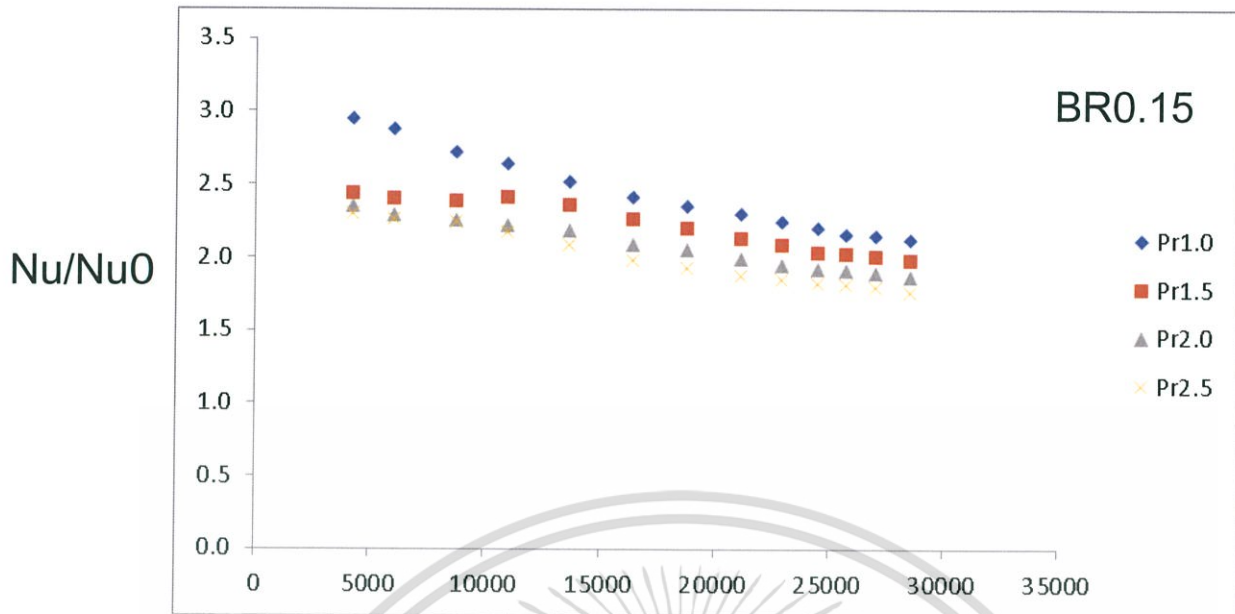
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทดลองโดยศึกษาอิทธิพลของระยะพิตช์ที่แตกต่างกัน

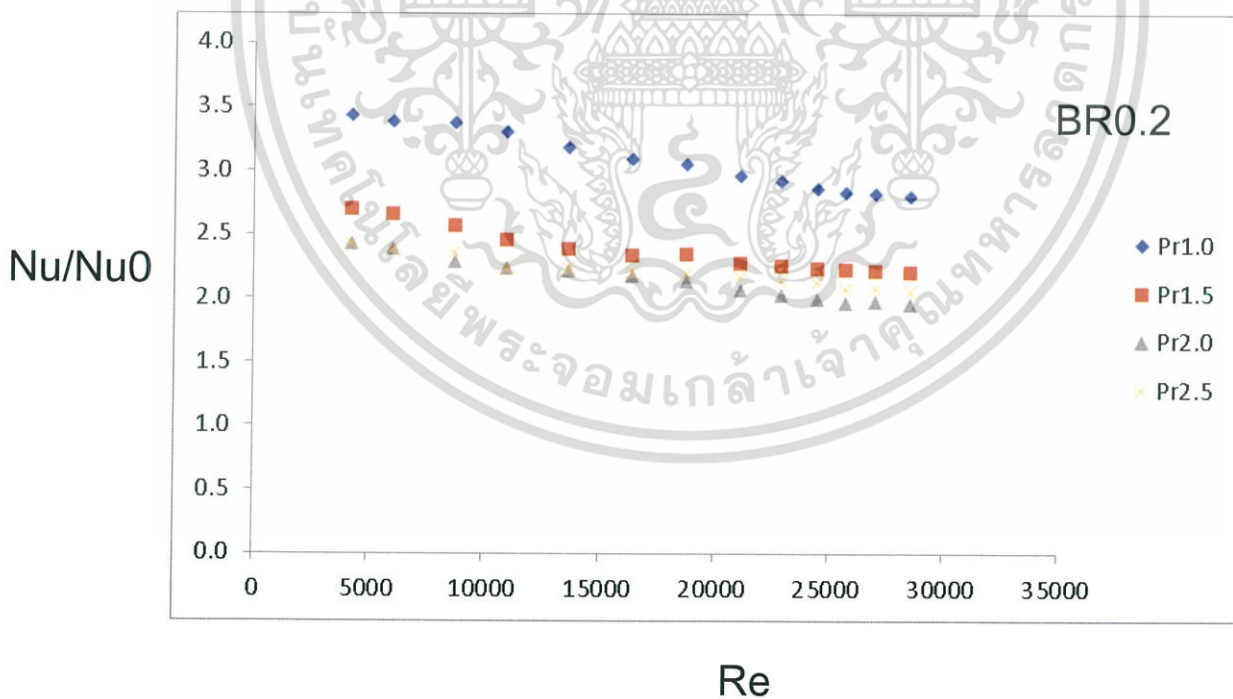
การเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซิลท์ของกรณีการสอดใส่ปีก ที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์ที่แตกต่างกัน ที่อัตราส่วนความสูงเท่ากับ 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 และวางเอียงมุมปะทะเท่ากับ 30° พบว่ากรณีการสอดใส่ปีกบางที่มีอัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 1.0 จะมีการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่า 1.5 2.0 และ 2.5 ตามลำดับและเหตุผลที่ระยะพิตช์น้อยจะมีการถ่ายเทได้ดีกว่าเนื่องมาจากอัตราส่วนระยะพิตช์จะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลทำงานถึงความรุนแรงของความปั่นป่วนโดยอัตราส่วนระยะพิตช์ที่มีค่าน้อยกว่าจะขัดขวางการไหลได้ดีกว่าซึ่งผลต่อความรุนแรงของความปั่นป่วนได้มากกว่า



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซิลท์ในการแสดงอิทธิพล BR

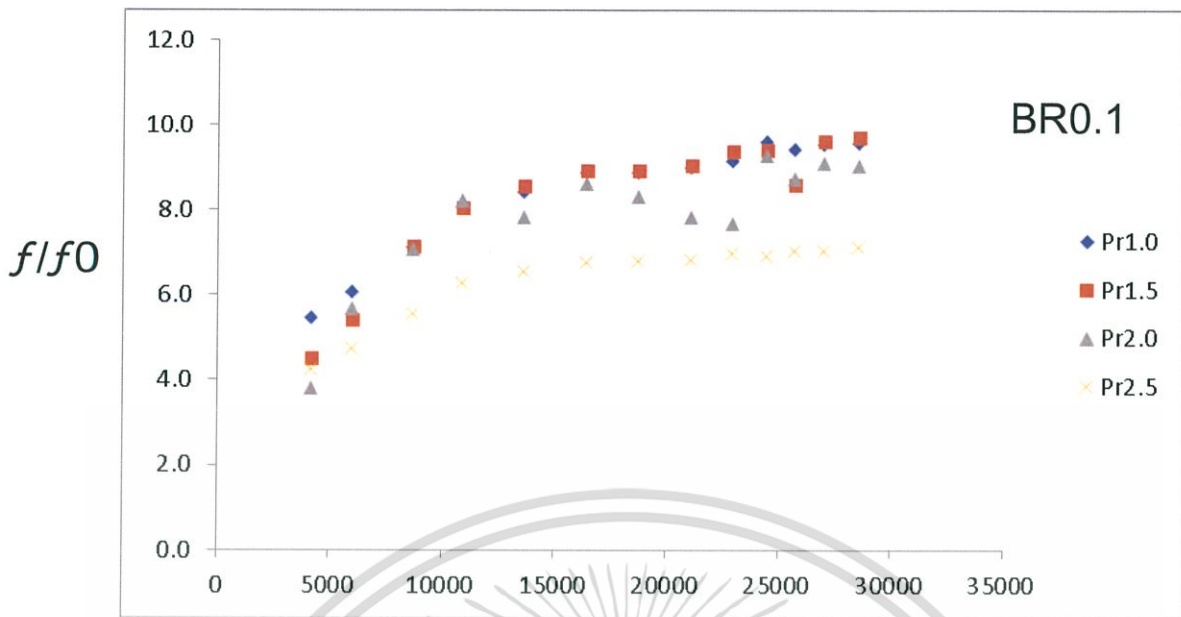


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลท์ในการ
แสดงอิทธิพล PR

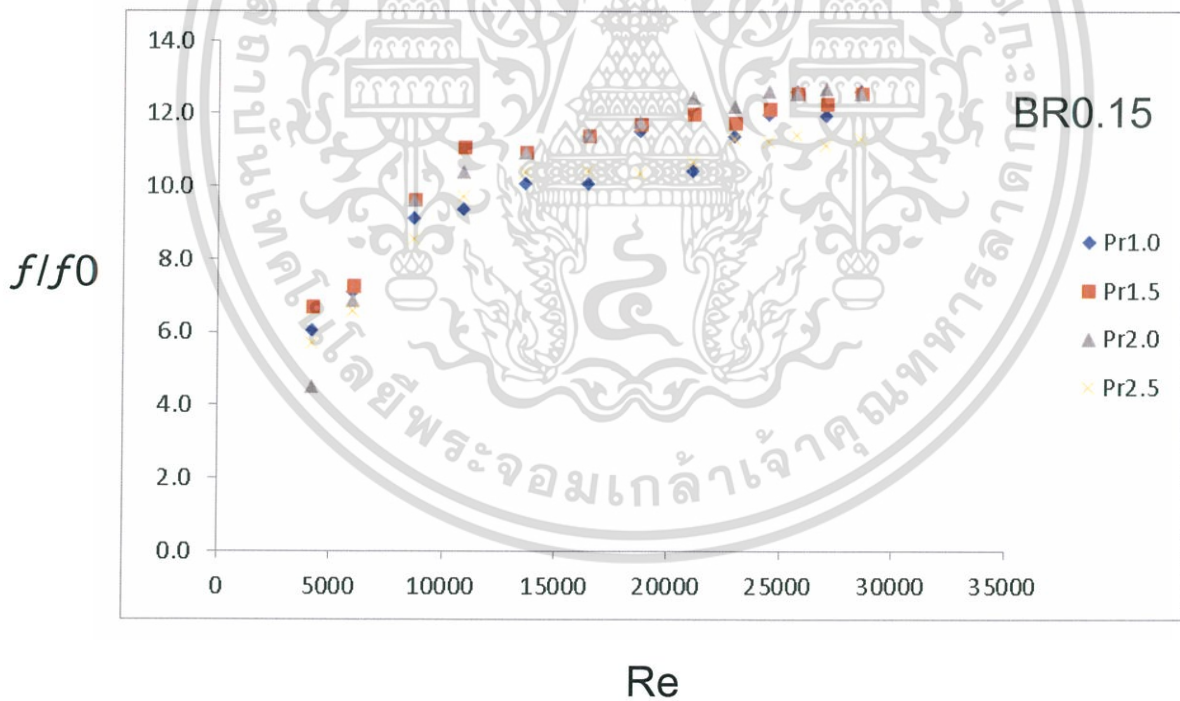


รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลท์ในการ
แสดงอิทธิพล PR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

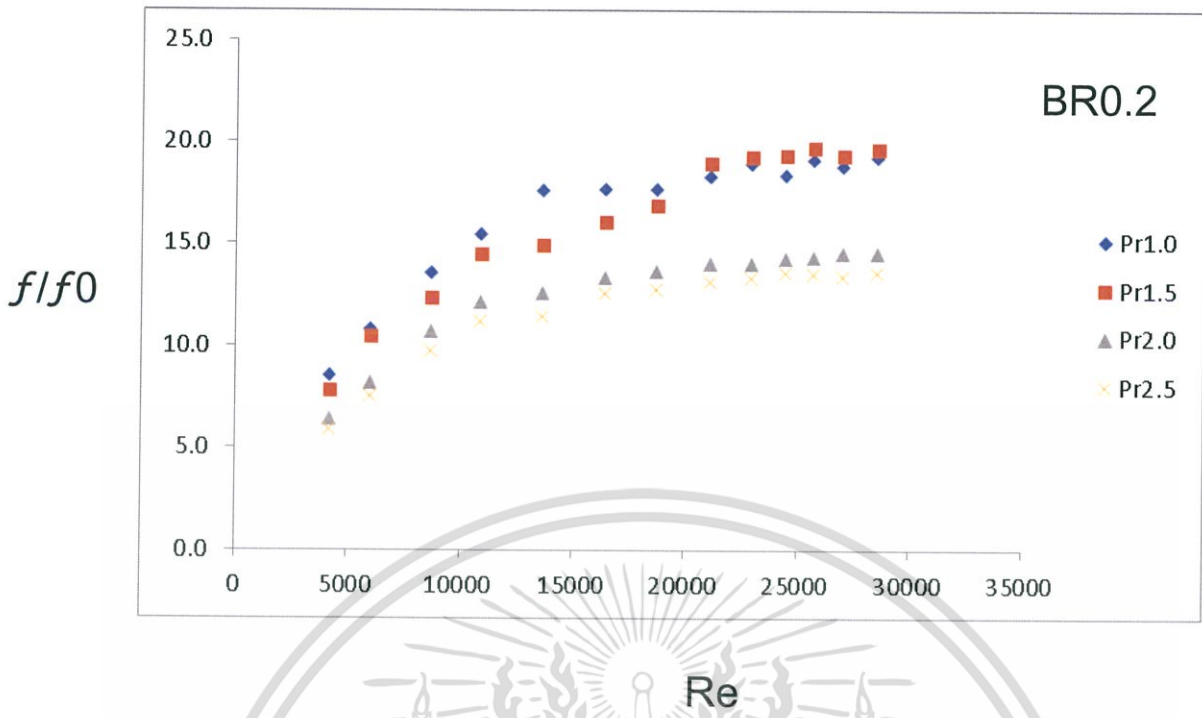


รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล PR

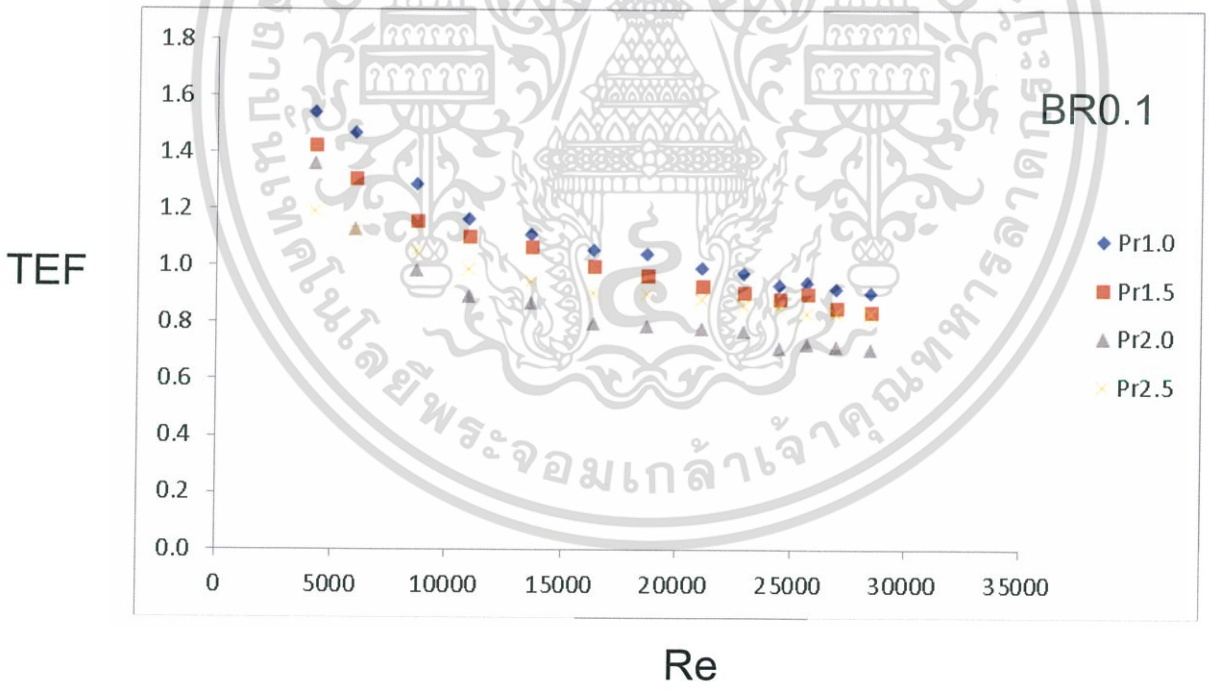


รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล PR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

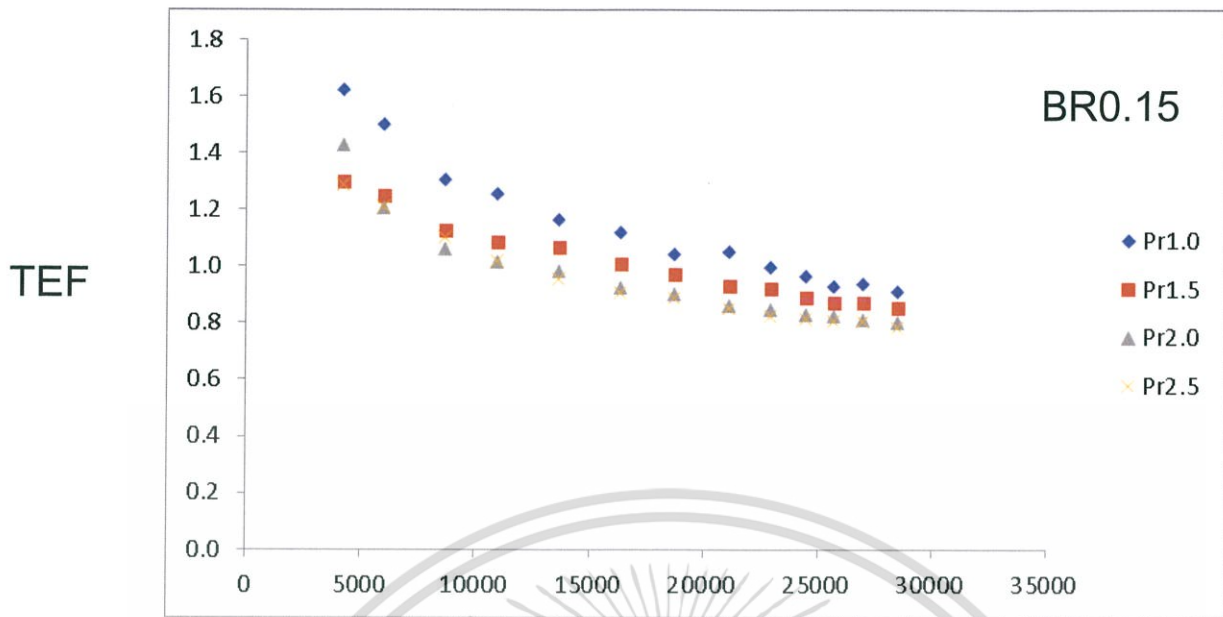


รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล PR

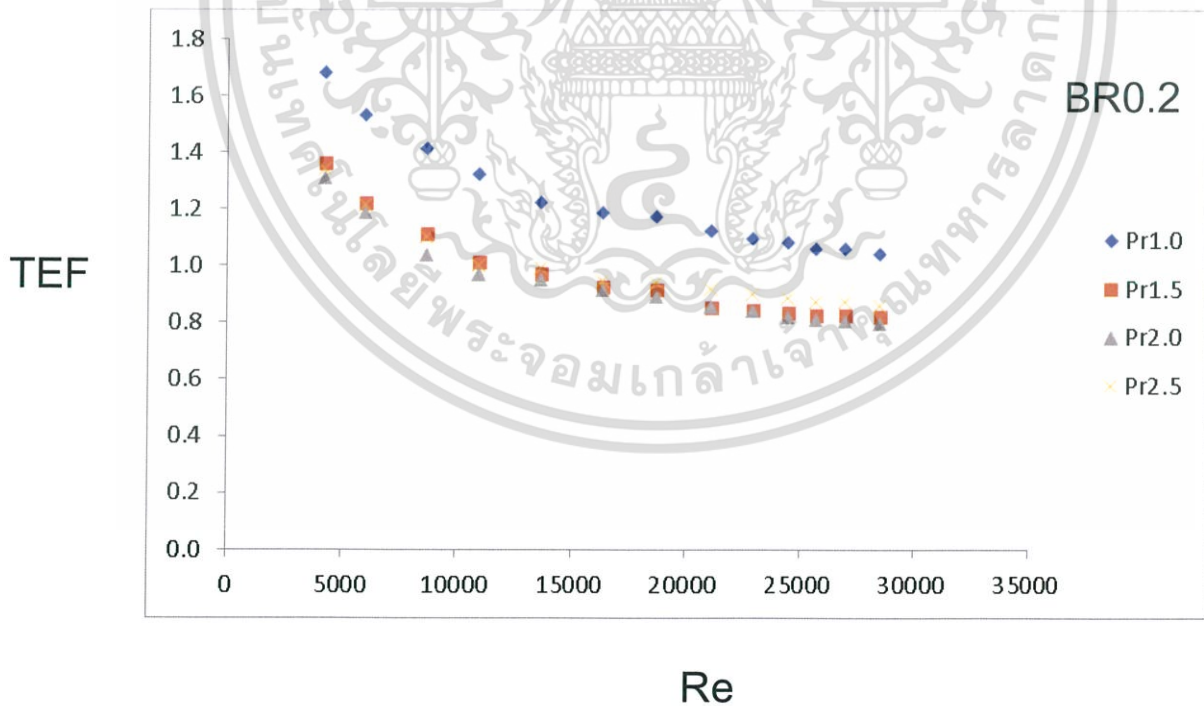


รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในการแสดงอิทธิพล PR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน
ในการแสดงอิทธิพล PR

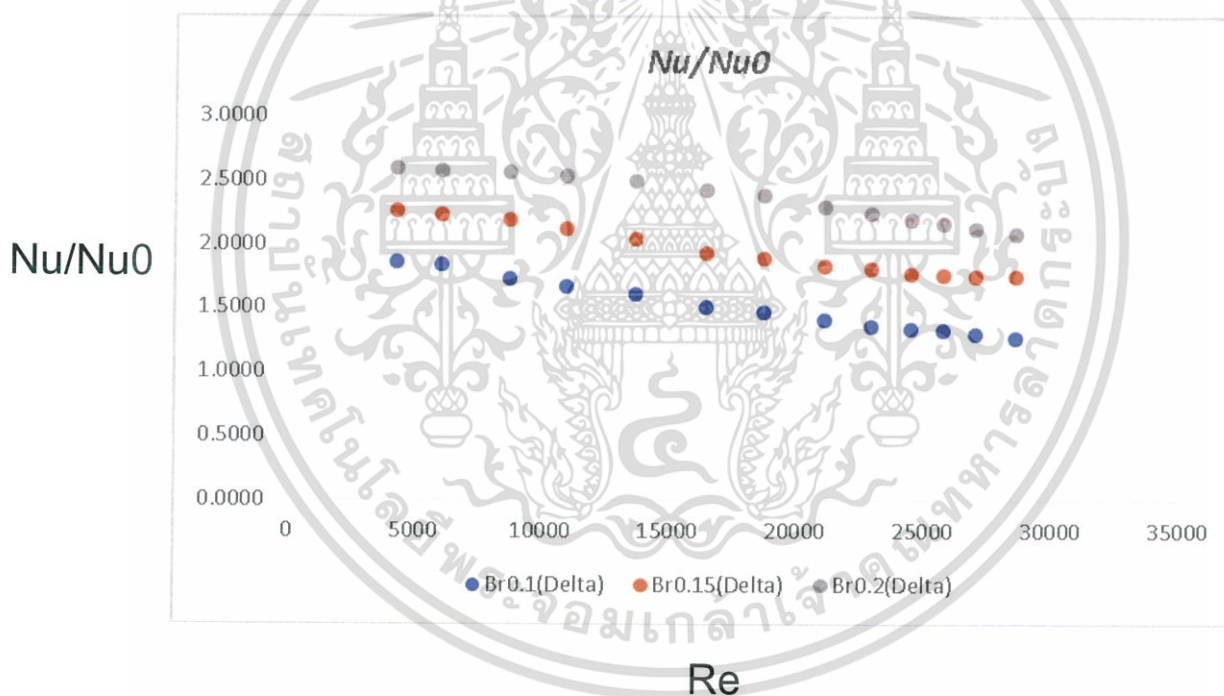


รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน
ในการแสดงอิทธิพล PR

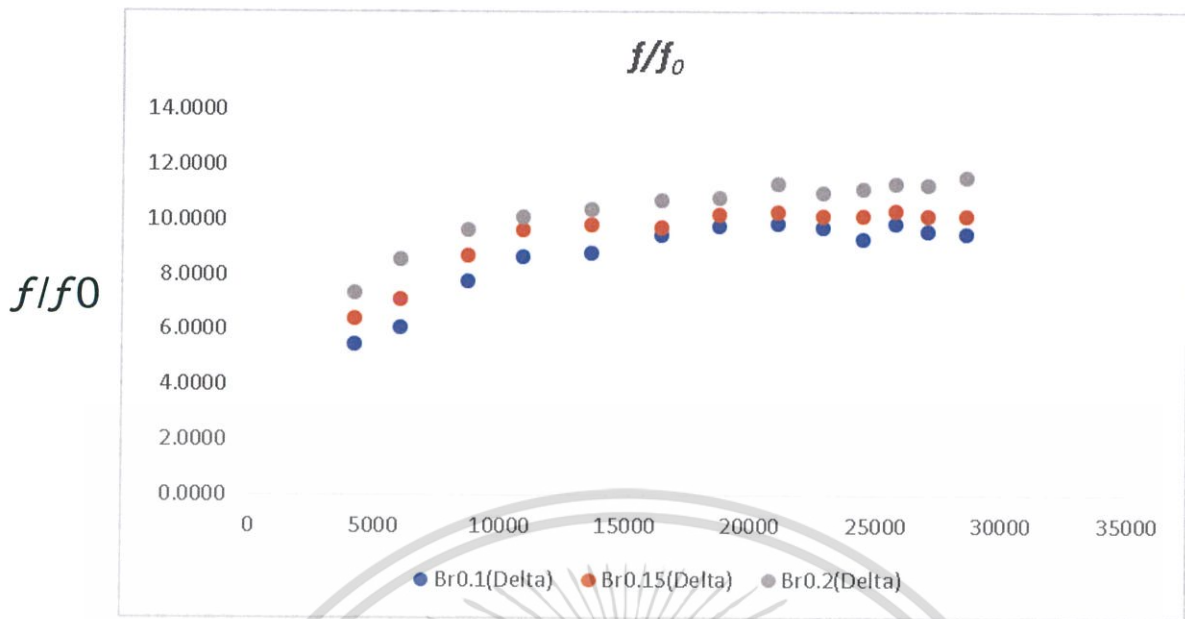
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 การทดลองโดยศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความสูงของปีกที่แตกต่างกันและลักษณะของปีกที่มีรูปแบบแตกต่างกัน

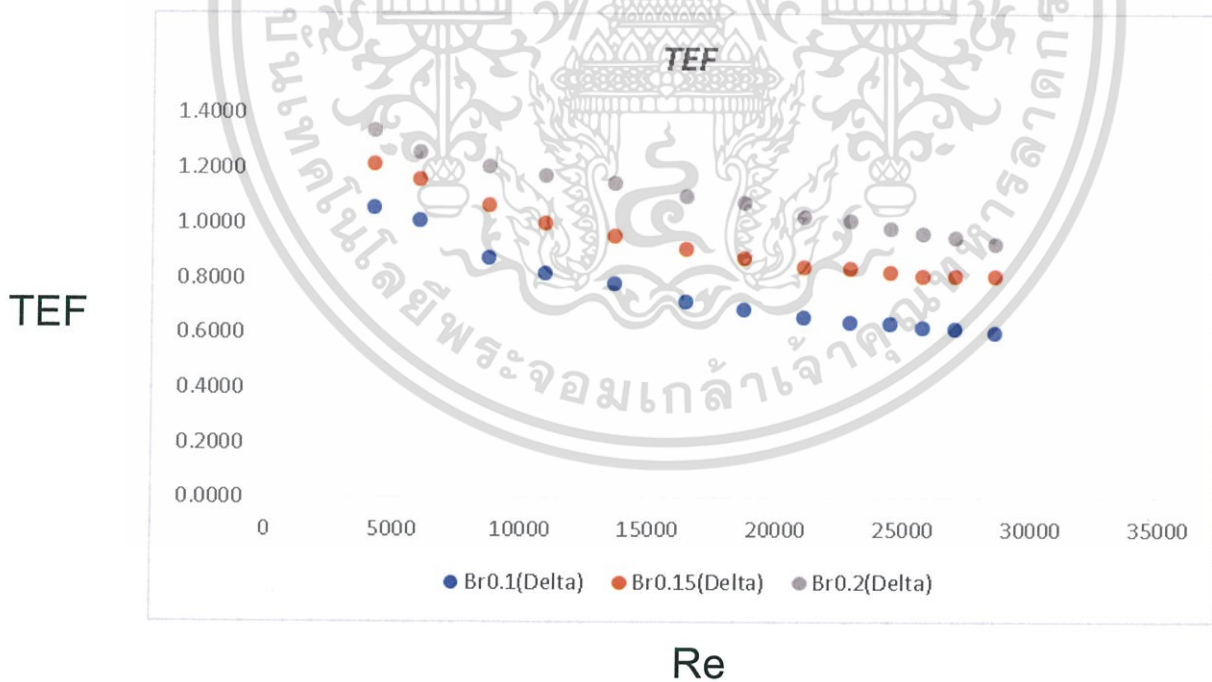
การเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซิลท์ของกรณีการสอติปีกที่มีอัตราส่วนความสูงที่แตกต่างกัน อัตราส่วนระยะพิทช์เท่ากับ 1.0 ได้มีการวางในแนวกึ่งกลางท่อและรูปแบบของปีกมีลักษณะแตกต่างกันอย่างแรกคือปีกแบบปกติรูปปีกมีลักษณะสี่เหลี่ยมส่วนอีกลักษณะเป็นปีกรูปสามเหลี่ยมและวางเอียงมุมปะทะเท่ากับ 30° ตามลำดับพบว่า การใส่ครีบบนแบบตัดสามเหลี่ยมมีผลให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการใส่ครีบบนปกติโดยที่ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนได้ถูกเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความสูงของปีกโดยค่า 0.1 จะมีค่ามากกว่า 0.15 และ 0.2 ตามลำดับ และในส่วนของตัวประกอบเสียดทานจะถูกเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความสูงของปีก



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซิลท์ในการแสดงอิทธิพล BR และลักษณะปีก

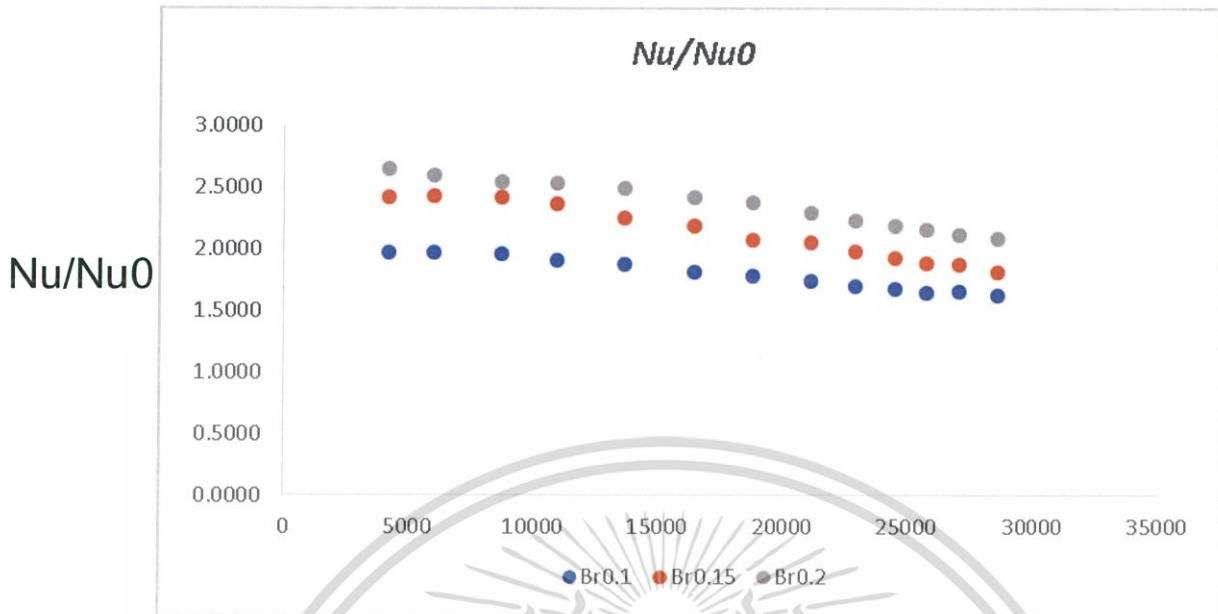


รูปที่ 5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR และลักษณะปีก

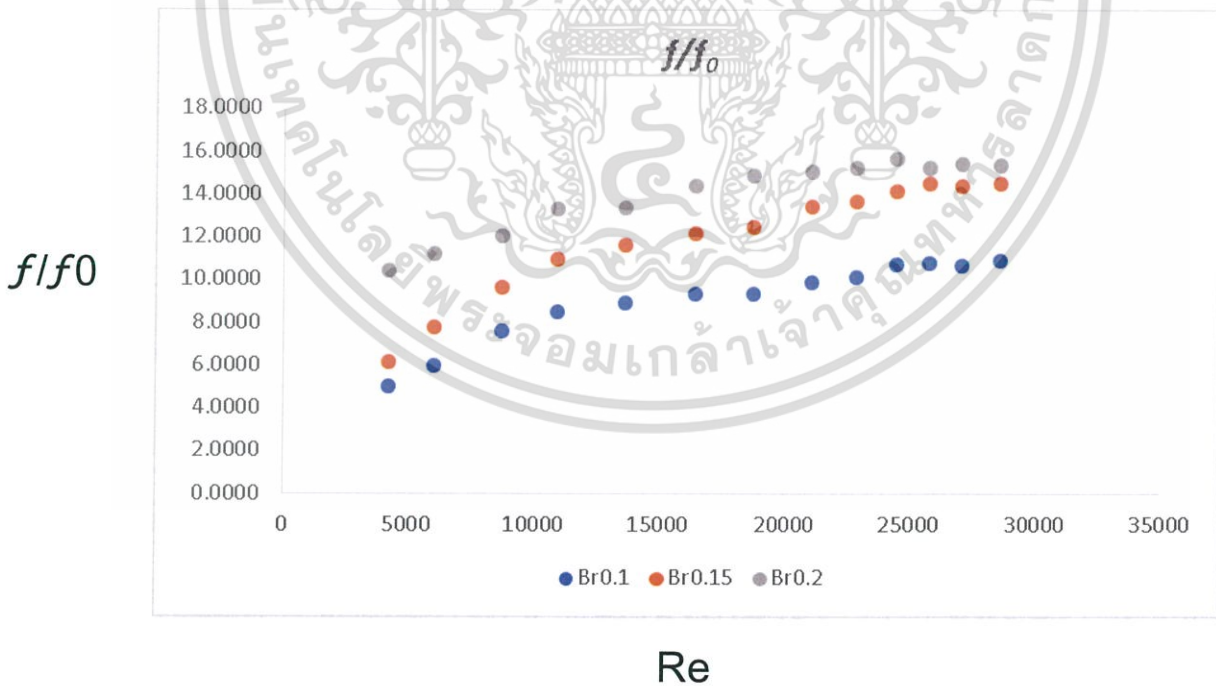


รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในการแสดงอิทธิพล BR และลักษณะปีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

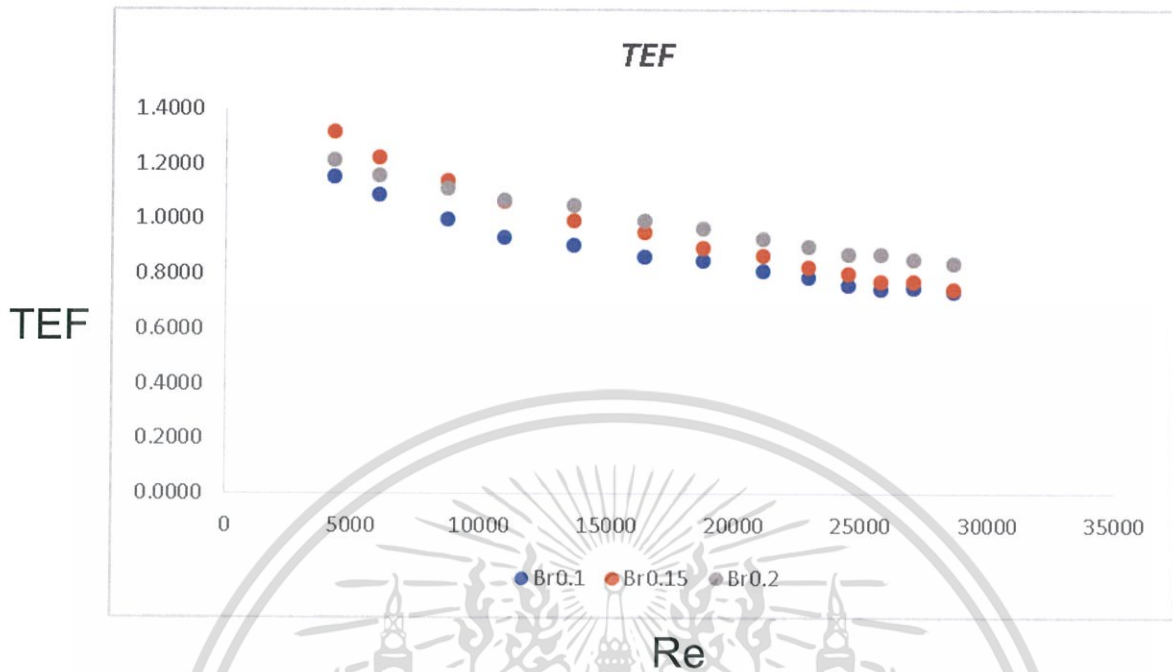


รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพล BR และลักษณะปีก



รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR และลักษณะปีก

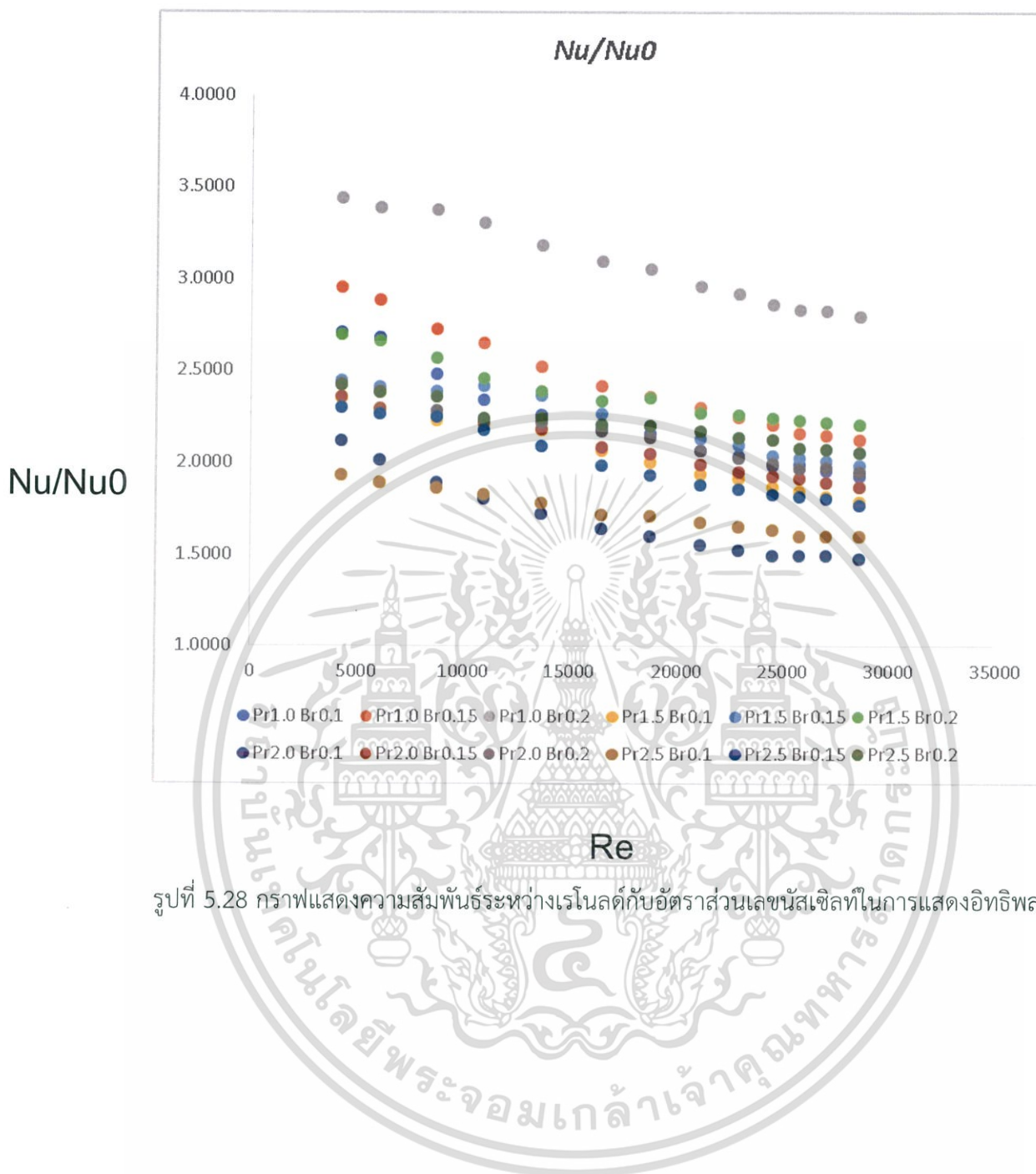
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพล BR และลักษณะปีก

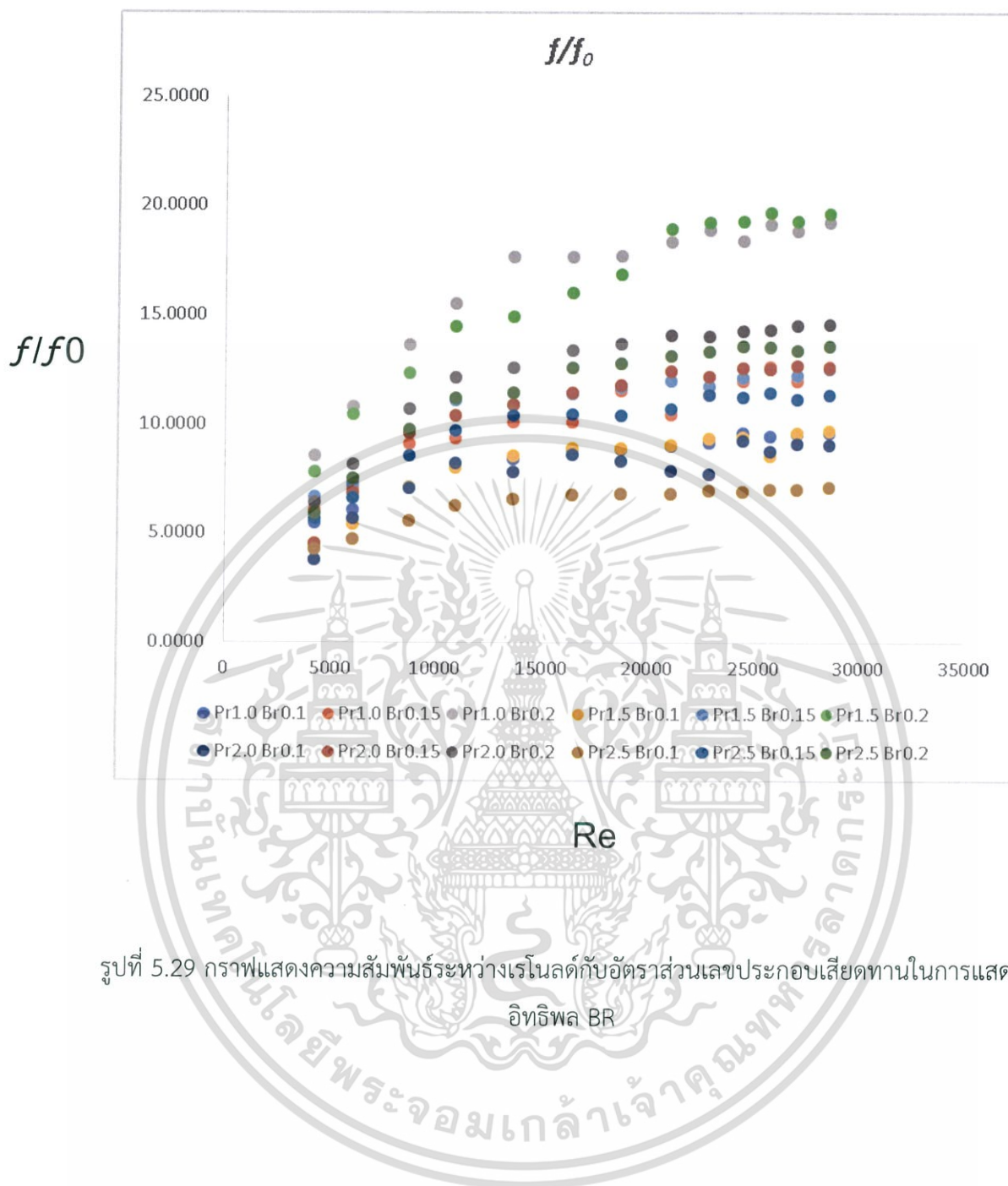
5.6 อภิปรายผลการศึกษา

จากผลการทดลองเราสามารถนำมาเทียบกับท่อเปล่าและดูพฤติกรรมของกราฟอัตราส่วนนัสเซิลท์และอัตราส่วนเลขประกอบเสียดทานได้ว่าในกรณีที่มีระยะพิตช์ที่มีค่าน้อยจะทำให้การหมุนวนเกิดความปั่นป่วนได้มากกว่าส่งผลให้มีอัตราส่วนนัสเซิลท์และอัตราส่วนเลขประกอบเสียดทานมีค่าสูงกว่าระยะพิตช์ที่มากกว่าเรียงลำดับตามนี้ 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 และอัตราส่วนความสูงปีกมีผลว่ายิ่งส่วนสูงปีกเยอะทำให้เกิดตัวประกอบเสียดทานมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยมีการจัดเรียงดังนี้ 0.2 0.15 และ 0.1 ส่วนค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าการแปรผกผันกับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเลขนัสเซิลท์สำหรับกราฟแสดงผลรูปแบบของปีกที่วางติดผนังท่อมี 12 เคสดังนี้

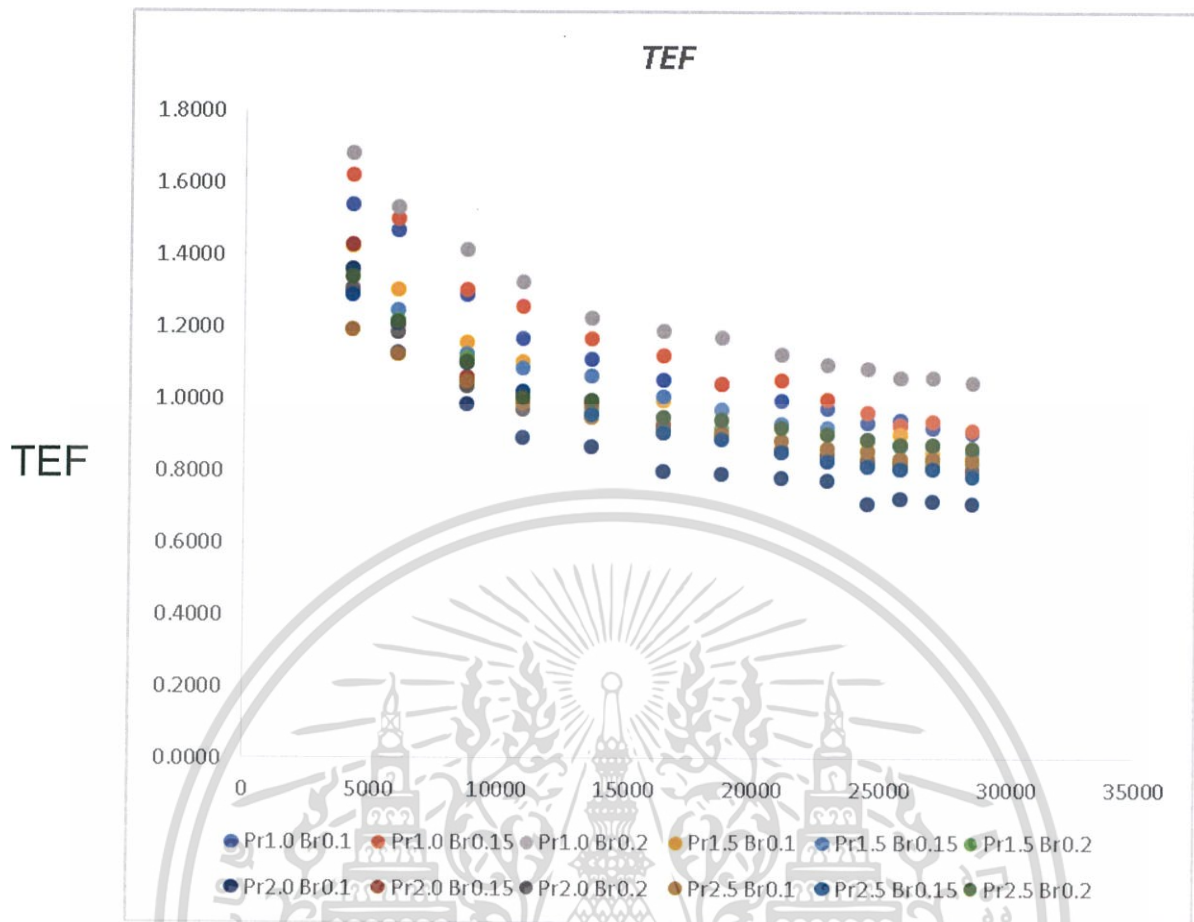


รูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพล BR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

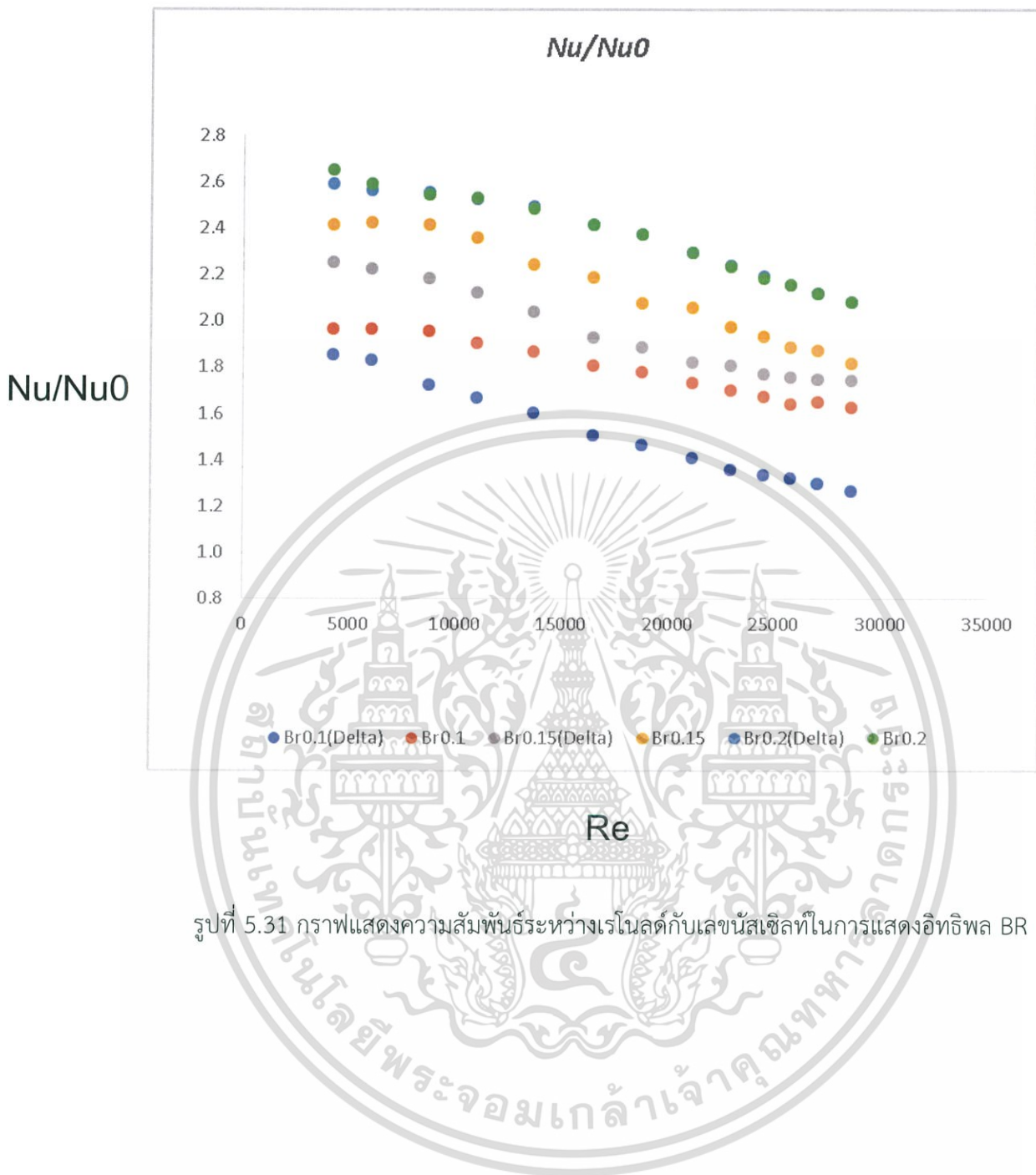


รูปที่ 5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับอัตราส่วนเลขประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล BR

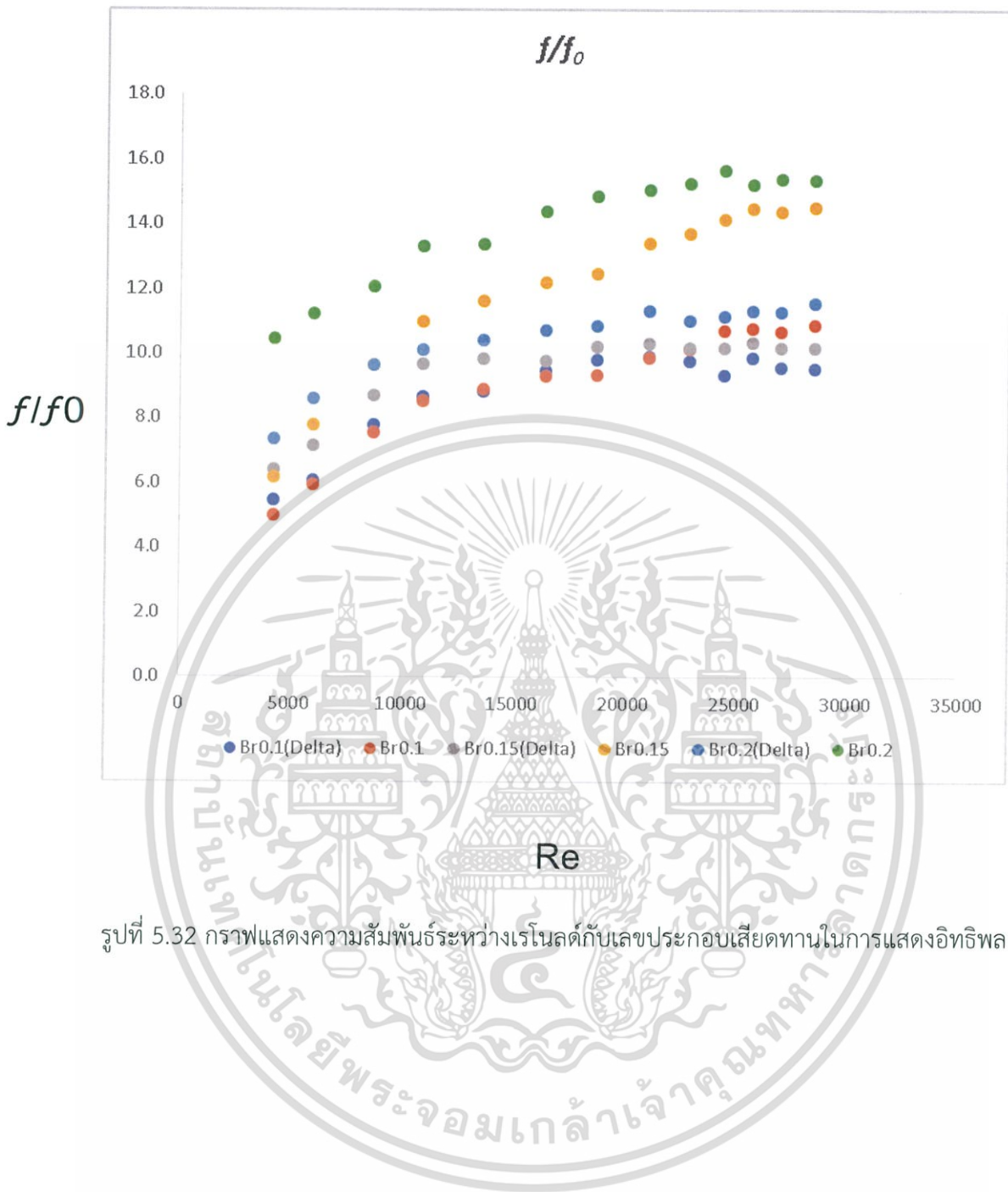


รูปที่ 5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบเพิ่มขึ้นทางความร้อนแสดงอิทธิพล BR

ส่วนในเคสที่ปีกไม่ติดผนังท่อมมีการเทียบอัตราส่วนนัสเซลล์ท์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานแล้วมีผลว่ารูปแบบปีกแบบสามเหลี่ยมมีผลให้ค่าแรงเสียดทานน้อยกว่าในระยยะพิตช์เดียวกันและส่งผลต่อให้มีค่าการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าในรูปปีกแบบปกติหรือสี่เหลี่ยมมันเองแต่ทั้งนี้ในเคสที่ไม่มีการขีดผิวทำให้ค่าการหมุนวนเพื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้น้อยจึงมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้น้อยกว่าในกรณีขีดผิวอย่างเห็นได้ชัดจนรูปกราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนนัสเซลล์ท์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรโนลด์สำหรับเคสปีกที่ไม่ติดผนัง 6 เคสมีดังนี้



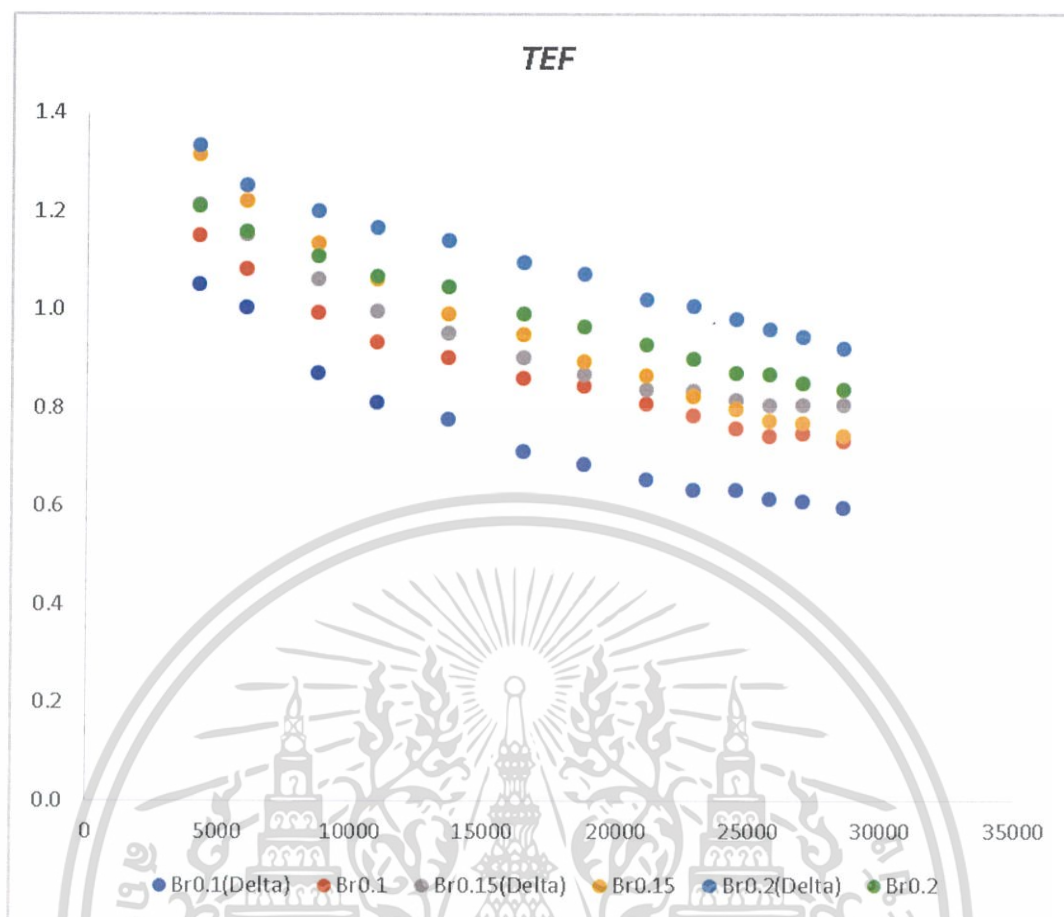
รูปที่ 5.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพล BR



รูปที่ 5.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขประกอบเสียตทานในการแสดงอิทธิพล BR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEF



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

อิทธิพลจากอัตราส่วนระยะพิตช์ (L/D) จากผลการศึกษาเชิงตัวเลขจะพบได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระยะพิตช์ จะทำให้ตัวเลขค่านัสเซิลท์เพิ่มมากขึ้นและตัวประกอบเสียดทานก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งจากการทดลองเราพบได้ว่า ที่กรณี PR=1.0 จะทำให้ค่าตัวประกอบทางความร้อน (TEF) มีค่าสูงสุด

อิทธิพลของอัตราส่วนความสูงคิบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (BR) จากการศึกษาเราจะพบว่ายิ่ง BR มีค่ามากขึ้นจะทำให้ตัวเลขนัสเซิลท์สูงขึ้นและมีผลโดยตรงกับตัวประกอบเสียดทานทำให้สูงขึ้นตามไปด้วยจากการทดลอง ในกรณี BR=0.1 จะให้ค่าตัวประกอบทางความร้อน (TEF) สูงที่สุดในแต่ละเคสที่มีตัวแปรอื่นเปลี่ยนไป

จากผลการศึกษการทดลองเราจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดคือกรณี PR=1.0 BR=0.2 จะให้ค่าตัวประกอบทางความร้อน (TEF) สูงที่สุดอยู่ที่ 1.68 ที่เลขเรโนลด์ 4271.3 และในกรณีคิบชิดผิวยังสามารถให้ค่าตัวประกอบทางความร้อนได้ดีกว่าคิบชนิดไม่ชิดผิวทั้ง 2 แบบที่เป็นคิบบแบบเดลด้าและคิบบแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าปกติ ทั้งนี้สาเหตุมาจากการวางคิบที่ไม่ชิดผิวทำให้เกิดการขวางกั้นการไหลและทำให้ตัวประกอบเสียดทานและตัวเลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นมากจึงทำให้ค่าตัวประกอบทางความร้อนมีค่าลดลงไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองจะพบได้ว่าสามารถพัฒนารูปแบบการวางคิบได้อีกหลายรูปแบบมาก เช่น การปรับมุมปะทะที่อาจจะมิต่ำกว่า มุม 30° ซึ่งจะทำให้เกิดการลู่ลมมากขึ้นอาจจะทำให้ตัวประกอบเสียดทานน้อยลง และจากอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของคิบต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (PR) อัตราส่วนความสูงของคิบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (BR) เป็นต้น การปรับค่าเหล่านี้เพื่อที่จะได้ ค่าตัวประกอบทางความร้อน (TEF) มากขึ้นไปได้อีกในอนาคต

บรรณานุกรม

- [1] Metzger, D.E., Fan, C.S. and Yu, Y. 1990. "Effects of Rib Angle and Orientation on Local Heat Transfer in Square Channels with Angled Roughness Ribs." in R.K. Shah, A.D. Kraus, D.E. Metzger, Compact Heat Exchangers, Hemisphere, Washington.
- [2] Han, J.C., Huang, J.J. and Lee, C.P. 1993. "Augmented heat transfer in square channels with wedge-shaped and delta-shaped turbulence promoters." J. Enhanced Heat Transfer. 1:37-52.
- [3] Zhang, Y.M., Gu, W.Z. and Han, J.C. 1994. "Heat transfer and friction in rectangular channels with ribbed or ribbed-grooved walls." ASME J. Heat Transfer. 116:58-65.
- [4] Taslim, M.E., Li, T. and Kercher, D.M. 1996. "Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped, and discrete ribs on two opposite walls." ASME J. Turbomachinery. 118: 20-28.
- [5] Gentry, M.C. and Jacobi, A.M. 1997. "Heat transfer enhancement by delta-wing vortex generators on a flat plate: vortex interactions with the boundary layer." Exp. Thermal Fluid Science. 14: 231-242
- [6] Olsson, C.O. and Sunden, B. 1998. "Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels." Thermal Fluid Science, 16: 349-365.
- [7] Ann, S.W. 2001. The effects of roughness types on friction factors and heat transfer in roughened rectangular duct.
- [8] Choi, C.Rhee, D.H. and Cho, H.H. 2002 "Heat transfers and Pressure drop in square duct with V-shaped"
- [9] Kanwa, R. 2003, "Studies of Augmented Heat Transfer and Friction in Asymmetrically Heated Rectangular Ducts with Ribs on Transverse Heat,
- [10] Tanda, G. 2004. "Heat transfer in rectangular channels with transverse and V shaped broken ribs." J. Heat Mass Transfer 47: 229-243