

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อด้วยครีบบางแหวน
Heat Transfer Augmentation in Tube with Ring Ribs

กุลชนก วอนเพียร
ตรีโรจน์ ชันชะลีย์ดำรงกุล
สัจพร ลูกประจำ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อด้วยครีบบางแหวน
Heat Transfer Augmentation in Tube with Ring Ribs

กุลชนก วอนเพียร
ตรีโรจน์ ชันชะลีย์ดำรงกุล
สัจจพร ลูกประจำ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

Heat Transfer Augmentation in Tube with Ring Ribs

Kulchanok Wonpear

Trirot Khanchaleedamrongkul

Satjaporn Lookprakam

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

2017

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

สาขาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อด้วยครีบบงแหวน

Heat Transfer Augmentation in Tube with Ring Ribs

ผู้จัดทำ

- | | |
|--------------------------------|-----------------------|
| 1.นางสาวกุลชนก วอนเพียร | รหัสประจำตัว 57010111 |
| 2.นายตรีโรจน์ ชันชะลีย์ดำรงกุล | รหัสประจำตัว 57010489 |
| 3.นางสาวสัจจพร ลูกประจำ | รหัสประจำตัว 57011332 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อด้วยครีบบางแหวน

นางสาวกุลชนก วอนเพียร	57010111
นายตรีโรจน์ ชันชะลีย์ดำรงกุล	57010489
นางสาวสัจจพร ลูกประจำ	57011332
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560	

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์นี้ถูกจัดทำขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ ANSYS (FLUENT) ในการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนของอากาศทั้งสามแนวแกน การเคลื่อนที่ภายในท่อครีบบางแหวน ซึ่งครีบบางแหวนทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อและนำของไหลเย็นไปสัมผัสผนังร้อน โดยในการทดสอบใช้ของไหลเป็นอากาศ ที่มีอัตราการไหลในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ระหว่าง 4000 ถึง 15,000 ของไหลจะถูกทำการทดสอบเพื่อศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number, Nu) และการสูญเสียความดันในรูปตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor, f) โดยครีบบางแหวนถูกทดสอบโดยใช้มุมปะทะ (α) 4 ค่า คือ 20, 30, 45, และ 60 องศา อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหรืออัตราส่วนพิทช์ $PR = p/d = 0.5, 1.0,$ และ 1.5 อัตราส่วนความสูงของครีบบางแหวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหรืออัตราส่วนบล็อกการไหล $BR = e/d = 0.05, 0.1,$ และ 0.15 และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววี (w) คือ 5 มิลลิเมตร จากการศึกษานี้จะพบว่าท่อที่ทำการติดตั้งครีบบางแหวนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าท่อแบบเรียบ และค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 2.53 ที่มุมปะทะเท่ากับ 30 องศา อัตราส่วนพิทช์เท่ากับ 0.5 อัตราส่วนบล็อกการไหลเท่ากับ 0.05 และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววีเท่ากับ 5 มิลลิเมตรที่ค่าเลขเรย์โนลด์ 4000

Heat Transfer Augmentation in Tube with Ring Ribs

Kulchanok	Wonpear	57010111
Trirot	Khanchaleedamrongkul	57010489
Satjaporn	Lookprakam	57011332
Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge	Advisor	

Academic Year 2017

Abstract

This thesis presents a numerical investigation on heat transfer enhancement by a commercial software, ANSYS (FLUENT) for calculating a three dimensional turbulent flow in tube with ring ribs. The ring ribs will cause counter-rotating vortices inside the tube and convey the colder fluid to the heated-wall region. The test fluid is air having the flow rate in terms of Reynolds number (Re) from 4000 to 15,000. The heat transfer and pressure loss are displayed in the form of Nusselt number (Nu) and friction factor (f) while thermal enhancement factor (TEF) is employed as a thermal performance indicator. The ring ribs have been tested with four attack angles (α) 20° , 30° , 45° , and 60° ; three rib pitch ratios, $PR = p/d = 0.5, 1.0, 1.5$; and three rib height ratios, called blockage ratio, $BR = e/d = 0.05, 0.1, 0.15$ at a single rib size, $w = 5$ mm. The tube with ring ribs provided higher thermal performance than the smooth tube alone, the ring rib at $\alpha = 30^\circ$, $BR = 0.05$, $PR = 0.5$, and $w = 5$ mm gives the maximum thermal enhancement factor of 2.53 at $Re = 4000$.

กิติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบบวงแหวนสำเร็จลุล่วงไปได้โดยความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งทางกลุ่มผู้ทำงานวิจัยต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์

ขอขอบคุณอาจารย์สมบัติ ทำนา ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการศึกษาวิจัยซึ่งเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆน้องๆผู้ร่วมงานจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือซ้ำพเจ้าในทุกๆด้านที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นางสาวกุลชนก วอนเพียร

นายตรีโรจน์ ชันชะลีย์ดำรงกุล

นางสาวสัจจพร ลูกประจำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมุติฐาน.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน.....	5
2.2.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์และของไหล	5
2.2.2 การไหลแบบราบเรียบหรือการไหลเป็นชั้นๆกับการไหลแบบปั่นป่วน	6
2.2.3 การไหลในท่อกลม.....	7
2.2.4 ตัวประกอบความเสียดทาน.....	8
2.2.5 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน.....	9
2.2.5.1 วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน	9
2.2.5.2 สภาวะการถ่ายเทความร้อน.....	10
2.2.5.3 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน.....	10
2.2.5.4 การพาความร้อน.....	11
2.3 การคำนวณการไหลแบบชั่วเป็นช่วง	13
2.3.1 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความเร็ว.....	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1.1 นಿಯามของความเร็วเมื่อมีการไหลช้าเป็นช่วง.....	14
2.3.1.2 นಿಯามของความดันเมื่อมีการไหลช้าเป็นช่วง	14
2.3.2 การไหลช้าเป็นช่วงเชิงความร้อน	15
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.4.1 Meng et al. การถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ใส่ครีบทัววีแบบแยกกัน.....	16
2.4.2 Chingtuaythong et al. การถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ใส่แหวนรูปต้ววี.....	16
2.4.3 Huang et al. การถ่ายเทความร้อนในท่อกลมด้วยการกดร่อง.....	19
2.5 แนวทางการศึกษาวิจัย	20
บทที่ 3 การออกแบบแบบจำลองและขั้นตอนการศึกษา	22
3.1 รูปแบบของวงแหวนรูปต้ววีที่ใช้ในการศึกษา	22
3.1.1 วงแหวนรูปต้ววีแบบมาตรฐาน	22
3.1.2 วงแหวนรูปต้ววีปรับปรุงแบบที่ 1.....	23
3.1.3 วงแหวนรูปต้ววีปรับปรุงแบบที่ 2	24
3.1.4 วงแหวนรูปต้ววีปรับปรุงแบบที่ 3.....	25
3.2 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์ปัญหา.....	26
3.3 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ.....	27
3.4 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	27
3.4.1 การตรวจสอบแบบจำลองปั่นป่วน	27
3.5 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม.....	29
3.6 วิธีการดำเนินการศึกษา	30
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	32
4.1 วงแหวนรูปต้ววีแบบมาตรฐาน	32
4.1.1 วงแหวนรูปต้ววีแบบมาตรฐาน.....	32
4.1.2 วงแหวนรูปต้ววีปรับปรุงแบบที่ 1	37
4.1.3 วงแหวนรูปต้ววีปรับปรุงแบบที่ 2	42
4.1.4 วงแหวนรูปต้ววีปรับปรุงแบบที่ 3	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การอภิปรายผลงานวิจัย.....	55
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	57
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	57
6.2 ข้อเสนอแนะและการพัฒนางานวิจัย.....	58
บรรณานุกรม.....	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 สรุปผลที่ดีที่สุดในแต่ละกรณีที่ได้จากการศึกษาการกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววี.....	56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลผ่านผิวของวัตถุ.....	6
2.2 การไหลอย่างสมบูรณ์ภายในท่อกลม	8
2.3 ตัวประกอบความเสียหายสำหรับการไหลแบบสมบูรณ์ในท่อกลม.....	9
2.4 รูปทรงเรขาคณิตที่เข้าเป็นช่วง.....	14
2.5 ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีครีบทัววีแบบแยกกัน	16
2.6 แหวนรูปต้ววี.....	17
2.7 กราฟค่าตัวเลขนัสเซลล์ที่มีการใส่แหวนรูปต้ววี	17
2.8 กราฟค่าตัวประกอบความเสียหายที่มีการใส่แหวนรูปต้ววี.....	18
2.9 กราฟค่าประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ใส่แหวนรูปต้ววี.....	18
2.10 การเจาะร่องท่อ.....	19
2.11 กราฟแสดงค่าตัวเลขนัสเซลล์ที่มีการกดวงแหวนเป็นช่วงๆ.....	20
3.1 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อกดวงแหวนรูปต้ววีแบบมาตรฐาน	23
3.2 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อกดวงแหวนรูปต้ววีปรับปรุงแบบที่ 1	24
3.3 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อกดวงแหวนรูปต้ววีปรับปรุงแบบที่ 2	25
3.4 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อกดวงแหวนรูปต้ววีปรับปรุงแบบที่ 3	26
3.5 $Nu/Pr^{1/3}$ จากแบบจำลองปั่นป่วน $k - \epsilon$ และผลการทดลองของ J-meng.....	28
3.6 ตัวประกอบความเสียหายจากแบบจำลองปั่นป่วน $k - \epsilon$ และผลการทดลองของ J-meng.....	28
3.7 รูปแบบกริดและขอบเขตการไหลของท่อกลมที่มีการใส่วงแหวนรูปต้ววี.....	29
3.8 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า $Nu/Pr^{1/3}$ ที่ $Re=30000$	30
4.1 ท่อกดวงแหวนต้ววีแบบมาตรฐาน.....	33
4.2 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติท่อกดวงแหวนต้ววีแบบมาตรฐาน.....	33
4.3 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อกดท่อเป็นท่อกดวงแหวนรูปต้ววีแบบมาตรฐาน.....	34
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)	35
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียหายกับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)	35
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)	36
4.7 ท่อกดวงแหวนต้ววีปรับปรุงแบบที่1.....	37
4.8 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติท่อกดวงแหวนต้ววีปรับปรุงแบบที่ 1.....	38
4.9 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อกดท่อเป็นท่อกดวงแหวนรูปต้ววีปรับปรุงแบบที่ 1.....	38

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) (แบบปรับปรุงที่ 1).....	39
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับ Blockage Ratio (BR) (แบบปรับปรุงที่ 1).....	39
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) (แบบปรับปรุงที่ 1)	40
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับ Blockage Ratio (BR) (แบบปรับปรุงที่ 1).....	40
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) (แบบปรับปรุงที่ 1)	41
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับ Blockage Ratio (BR) (แบบปรับปรุงที่ 1).....	42
4.16 ท่อคดงแหวนตัววีปรับปรุงแบบที่ 2	43
4.17 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติท่อคดงแหวนตัววีปรับปรุงแบบที่ 2.....	43
4.18 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อคดงเป็นท่อคดงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2.....	44
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) (แบบปรับปรุงที่ 2).....	45
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับ Pitch Ratio (PR) (แบบปรับปรุงที่ 2).....	45
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) (แบบปรับปรุงที่ 2).....	46
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับ Pitch Ratio (PR) (แบบปรับปรุงที่ 2).....	46
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) (แบบปรับปรุงที่ 2).....	47
4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับ Pitch Ratio (PR) (แบบปรับปรุงที่ 2)	48
4.25 ท่อคดงแหวนตัววีแบบปรับปรุงที่ 3.....	49
4.26 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติท่อคดงแหวนตัววีแบบปรับปรุงที่ 3.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อกดต่อเป็นท่อคดวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3	50
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) (แบบปรับปรุงที่ 3).....	51
4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) กับมุมปะทะ (α) (แบบปรับปรุงที่ 3).....	51
4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) (แบบปรับปรุงที่ 3).....	52
4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับมุมปะทะ (α) (แบบปรับปรุงที่ 3).....	52
4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) (แบบปรับปรุงที่ 3)	53
4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับมุมปะทะ (α) (แบบปรับปรุงที่ 3)	53

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_c	พื้นที่หน้าตัด, m^2
A_s	พื้นที่ผิว, m^2
BR	อัตราส่วนการบล็อกการไหล
C	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, $J/kg \cdot K$
C_f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
C_p	ความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่, $J/kg \cdot K$
C_v	ความร้อนจำเพาะของของไหลที่ปริมาตรคงที่, $J/kg \cdot K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter), m
e	ความสูงแผ่นกั้น, m
f	ตัวประกอบแรงเสียดทาน
f_0	ตัวประกอบแรงเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, $W/m^2 \cdot K$
i	พลังงานภายใน, J/kg
k	ค่าการนำความร้อน, $W/m^2 \cdot K$
L	ความยาวท่อ, m
\dot{m}	อัตราการไหลของของไหล, kg/s
Nu	นัสเซลท์นัมเบอร์
Nu_0	นัสเซลท์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบ
P	เส้นรอบรูป, m
Pr	พลาตันนัมเบอร์
PR	ระยะพิตต์
ΔP	ความดันลดของของไหล, N/m^2
Q	อัตราการไหลของของไหล, m^3/s
q_{conv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด, W

รายการคำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

q_s''	ฟลักซ์ความร้อนที่ผิว, W/m^2
R	ค่าคงที่ของก๊าซ, $J/kg \cdot K$
Re	เลขเรย์โนลด์
r_0	รัศมีท่อกลม, m
T	อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ, $^{\circ}C$
T_b	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, $^{\circ}C$
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ, $^{\circ}C$
$T_{m,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อทางเข้า, $^{\circ}C$
$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อทางออก, $^{\circ}C$
T_s	อุณหภูมิเฉลี่ยผิวครีป, $^{\circ}C$
u	ความเร็วตามแนวแกน x, m/s
u_m	ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ, m/s
\bar{V}	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s
ρ	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
μ	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล, $N \cdot s/m^2$
μ_s	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหลที่ผิว, $N \cdot s/m^2$
ν	ประมาณจำเพาะ, m^2/s
τ_r	ความเค้นเฉือนในแนวรัศมี, N/m^2
τ_s	ความเค้นเฉือนบนผิว, N/m^2

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันโลกมีประชากรเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จึงต้องการพลังงานมากขึ้น ทั้งในภาคเกษตร และภาคอุตสาหกรรม เพื่อพัฒนาและเพิ่มศักยภาพ ของวัตถุดิบ อุปกรณ์ และเครื่องจักรต่างๆ และในภาคอุตสาหกรรมงานทางด้านความร้อน หากมีระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีจะส่งผลอย่างมากต่อการประหยัดพลังงาน เมื่อนำความร้อนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิต ดังนั้น การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง

การพาความร้อนโดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบมีให้เห็นในชีวิตประจำวันของเราอย่างเช่น เครื่องปรับอากาศ เครื่องจักรกล ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ล้วนต้องอาศัยกระบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาทั้งสิ้น โดยทั่วไปวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Heat convection) สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลักๆ คือ 1) วิธีที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกในการช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Passive technique) คือ การเพิ่มพื้นที่ผิวหรือเพิ่มการติดตั้งการสร้างความปั่นป่วนเข้าไปภายในท่อเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำและเกิดความปั่นป่วนของการไหลมากขึ้นช่วยให้สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มพื้นที่ผิวภายในท่อยังทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในท่อด้วยเช่นกัน 2) วิธีที่ต้องการพลังงานจากภายนอกเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Active technique) คือ การนำอุปกรณ์ภายนอกมาช่วยทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของไหลภายในท่อ เช่น อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้า เมื่อของไหลเกิดการสั่นสะเทือนมากขึ้น จึงสามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ ในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้วิธี passive technique เนื่องจากต้นทุนในการผลิตต่ำและสามารถปรับเปลี่ยนและพัฒนาได้หลากหลายรูปแบบ โดยวิธี passive technique ที่น่าสนใจวิธีหนึ่ง คือ การเพิ่มตัวสร้างความปั่นป่วนรูปทรงต่างๆ เพื่อเป็นตัวเหนี่ยวนำการไหลและสร้างการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อทดสอบ

อย่างไรก็ตามวิธีการ passive technique ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้นแต่ก็ยังทำให้ค่าความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการเลือกใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงสมรรถนะหรือประสิทธิภาพเพื่อให้สามารถนำมาใช้ได้อย่างเกิดประโยชน์สูงสุดซึ่งคุ้มค่างับการลงทุนและประโยชน์ในทางเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

เนื่องจากการเลือกตัวสร้างความปั่นป่วนที่จะใส่ภายในท่อเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งสำคัญจึงต้องพิจารณาทั้ง รูปทรง ขนาด มุมปะทะ และพารามิเตอร์อื่นๆ ที่จะมีผลกับการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทาน เพื่อให้การศึกษาสามารถหาค่าที่ได้เหมาะสม นอกจากนี้แล้วยังต้องคำนึงถึงขีดจำกัดในการทดลองไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองค่าตัวแปรที่ใช้

ในการศึกษาซึ่งจำเป็นต้องคำนึงถึงหลายส่วนด้วยกัน ดังนั้นจึงได้นำวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาใช้ในการศึกษาเพื่อเพิ่มความถูกต้อง แม่นยำ และเพื่อช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการศึกษาด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลที่มีลักษณะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติ และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการกุดต่อเป็นวงแหวนรูปตัววี โดยจัดวางแหวนรูปตัววีในท่อกลมแบบซี่ทวนกระแสการไหล ซึ่งได้กำหนดผนังท่อที่มีความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 18 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมอื่นๆ ได้อีกด้วย วัตถุประสงค์หลักๆของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

- 1.2.1 เพื่อศึกษางานวิจัยโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ซึ่งทำการศึกษาท่อกลมที่มีการกุดต่อเป็นวงแหวนรูปตัววี
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหล การถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อมและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่มีการกุดเป็นวงแหวนรูปตัววี โดยปรับปรุงแหวนตัววีในแบบต่างๆกัน
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาและปรับปรุงแหวนรูปตัววีแบบต่างๆ เพื่อนำไปสู่การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน, ลดค่าตัวประกอบเสียดทาน และเพิ่มค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น

1.3 สมมุติฐาน

จากการวิจัยได้ศึกษาโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) โดยมีสมมุติฐานในการศึกษาดังนี้

- 1.3.1 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ
- 1.3.2 เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและของไหลอัดตัวไม่ได้
- 1.3.3 แบบจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- 1.3.4 เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์และช้าเป็นช่วง
- 1.3.5 คุณสมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่
- 1.3.6 ไม่คำนึงแรงวัตถุและการสูญเสียเนื่องจากความหนืด
- 1.3.7 ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน
- 1.3.8 ให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังท่อ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ทำการศึกษาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) โดยศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในรูปของเลขนัสเซลและค่าตัวประกอบเสียดทาน
- 1.4.2 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ
- 1.4.3 ศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนอยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ ตั้งแต่ 4000 ถึง 15,000
- 1.4.4 ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\epsilon$
- 1.4.5 การคู่ควบของความเร็วและความดันใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE
- 1.4.6 เทอมของการพาความร้อนใช้การคำนวณแบบ QUICK
- 1.4.7 พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)
- 1.4.8 ทำการวิจัยเฉพาะท่อกลมที่มีการให้ความร้อนที่ผนังแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ 600 W/m^2
- 1.4.9 อัตราส่วนระยะห่างระหว่างความสูงครีบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (Pitch Ratio, PR) เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5
- 1.4.10 อัตราส่วนการบดบังการไหล (Blockage Ratio, BR) เท่ากับ 0.05, 0.1, 0.15
- 1.4.11 มุมปะทะ (α) เท่ากับ 20, 30, 45, 60 องศา
- 1.4.12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววี (w) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ทำการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลที่ในท่อที่มีการกุดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววี
- 1.5.2 กำหนดลักษณะรูปร่างของแหวนรูปตัววีโดยอ้างอิงขนาดและรูปแบบพื้นฐานจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ทำการตรวจสอบแบบจำลองที่เหมาะสมเทียบกับผลการทดลองของนักวิจัยในอดีตที่มีการกุดท่อรูปแบบต่างๆ
- 1.5.3 สร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลพร้อมกับเลือกขนาดและจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสม
- 1.5.4 คำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการไหลสามมิติ โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ Re, PR, BR, มุมปะทะ โดยจัดวางแหวนรูปตัววีแบบชี้ทวนกระแสการไหล
- 1.5.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณโดยเปรียบเทียบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ด้วยการสร้างกราฟเปรียบเทียบ

1.5.6 สรุปผลการวิจัยและให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1.6 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

- 1.6.1 ได้ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบเพิ่มตัวสร้างความปั่นป่วนภายในท่อกลมที่มีการกดวงแหวนรูปตัววี
- 1.6.2 ได้เรียนรู้ถึงอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่มีการกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีแบบต่างๆ
- 1.6.3 เพื่อการพัฒนาและออกแบบแหวนรูปตัววีให้มีความเหมาะสม และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้สูงสุด
- 1.6.4 เป็นแนวทางเพื่อการวิจัยด้านการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีต่อไป
- 1.6.5 เพื่อประหยัดพลังงานและนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต
- 1.6.6 เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงสมการ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือเครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่งโดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมือที่สำคัญมากอย่างหนึ่งเพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่างๆทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวางในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้องคำนึงถึงหน้าที่หลักของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างถูกหลักการและมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววี เพื่อสร้างกระแสการหมุนวนของการไหลและช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจึงจำเป็นต้องทำการศึกษางานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาและปรับปรุงรูปแบบการกดท่อเป็นวงแหวนตัววีในลักษณะต่างๆ

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

กลศาสตร์ของไหลมีความสำคัญอย่างยิ่งในโลกยุคปัจจุบัน เช่นสิ่งอำนวยความสะดวก เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ รวมถึงการพัฒนาเชิงอุตสาหกรรม ดังจะเห็นได้ชัดว่าล้วนประกอบไปด้วยการใช้งานของไหลแทบทั้งสิ้น เช่นระบบปรับอากาศ ระบบระบายน้ำและอากาศในอุตสาหกรรม เป็นต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะศึกษาวิชาการกลศาสตร์ของไหล เพื่อการคำนวณ การออกแบบ และการประยุกต์ระบบเพื่อให้มีการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

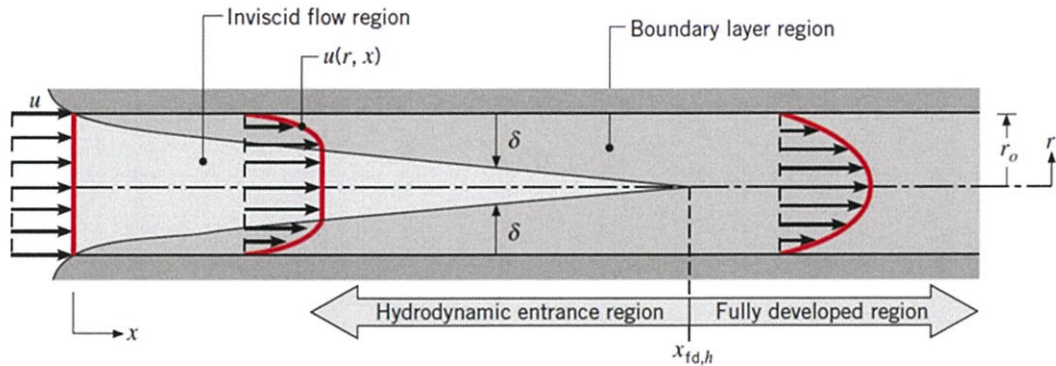
2.2.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์และของไหล

ของไหล (Fluid) หมายถึง สสารที่เปลี่ยนรูปร่างและไหลด้วยความเค้นเฉือน ของเหลวและก๊าซต่างๆ ก็เป็นรูปแบบหนึ่งของของไหล แต่ต่างกันตรงที่ก๊าซจะเป็นของไหลที่สามารถอัดตัวได้ ส่วนของเหลวนั้นไม่สามารถอัดตัวได้ หรืออัดตัวได้บ้างแต่ต้องใช้ความดันที่สูงมาก ของไหลอัดตัวได้คือของไหลที่มีความหนาแน่นไม่คงที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด เช่น ก๊าซที่อยู่ในภาชนะปิดสนิทเมื่อได้รับความร้อน ความหนาแน่นของก๊าซจะเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามถ้าหากสูญเสียความร้อนความหนาแน่นจะลดลง ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะของไหลที่อัดตัวไม่ได้เท่านั้น

- ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume, v) คือ ปริมาตร (V) ของสารนั้นๆ หารด้วยมวล (m) ซึ่งจะเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น
- ความหนืด (Viscosity, μ) คือ คุณสมบัติการต้านการเคลื่อนที่ของของไหล
- ความหนาแน่น (Density, ρ) คือ มวล (m) ของสารนั้นๆ หารด้วยปริมาตร (V)

- น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight, γ) คือความหนาแน่น (ρ) คูณกับค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) หรือน้ำหนัก (mg) หารด้วยปริมาตร

2.2.2 การไหลแบบราบเรียบหรือการไหลเป็นชั้นๆ (Laminar Flow) กับการไหลแบบปั่นป่วน(Turbulent Flow)



รูปที่ 2.1 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลผ่านผิวของวัตถุ

จากรูปที่ 2.1 พิจารณาการไหลแบบราบเรียบในท่อกลมที่มีรัศมี คือ r_0 เมื่อของไหลไหลเข้าสู่ท่อกลมด้วยความเร็วที่เหมือนกันตลอดหน้าตัดขวางการไหล จะเกิดความหนืดระหว่างของไหลกับผิวของท่อ และขอบเขตของการไหลจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะ x ที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นจากพื้นที่การไหลที่มีความหนืดได้ลดน้อยลง และรวมเข้ากับเส้นศูนย์กลางในที่สุด และจากการรวมเข้ากันกับเส้นศูนย์กลางนี้ทำให้ผลกระทบจากความหนืดและรูปแบบของความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะ x หรือสามารถตัดผลกระทบจากความหนืดทิ้งไปได้ ขอบเขตของการไหลแบ่งออกเป็น 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และชั้นขอบเขตการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ในการจำแนกการไหลว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือเป็นการไหลแบบปั่นป่วน สามารถแยกได้โดยใช้ตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า “เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re)” เป็นตัวกำหนดในการแยกการไหลโดย

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (2.1)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของของไหล, L คือ ความยาวตลอดช่วงของการไหล และ ν คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลนศาสตร์

เลขเรย์โนลด์เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนที่ของของไหลต่อความหนืด ดังนั้นจะเห็นว่าถ้าเลขเรย์โนลด์มีค่ามากแสดงให้เห็นว่าผลกระทบ (Effect) ของค่าความหนืดจะมีค่าน้อย เลขเรย์โนลด์ที่อยู่ในระหว่างเปลี่ยนจากการไหลแบบเป็นชั้นไปสู่การไหลแบบปั่นป่วนนั้นเรียกว่า “เลขเรย์โนลด์วิกฤติ (Critical Reynolds, Re_c)”

2.2.3 การไหลในท่อกลม

การไหลภายในท่อกลมบริเวณทางเข้าท่อแสดงในรูปที่ 2.2 นั้นจะเห็นว่า ชั้นขอบเขตของความเร็วในการไหลจะพัฒนาเพิ่มขึ้นทีละน้อยๆจนถึงระยะทางค่าหนึ่ง (L_c) ชั้นของความเร็วจึงทับซ้อนกันทั้งบนและล่าง หลังจากนั้นการกระจายตัวของความเร็วในการเคลื่อนที่ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เรียกว่าการไหลได้พัฒนาอย่างสมบูรณ์ (Fully Developed) เลขเรย์โนลด์ Re สำหรับการไหลภายในท่อนั้นถ้าให้ V เป็นค่าความเร็วเฉลี่ย D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของพื้นที่ตัดขวางท่อแล้วจะได้

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (2.2)$$

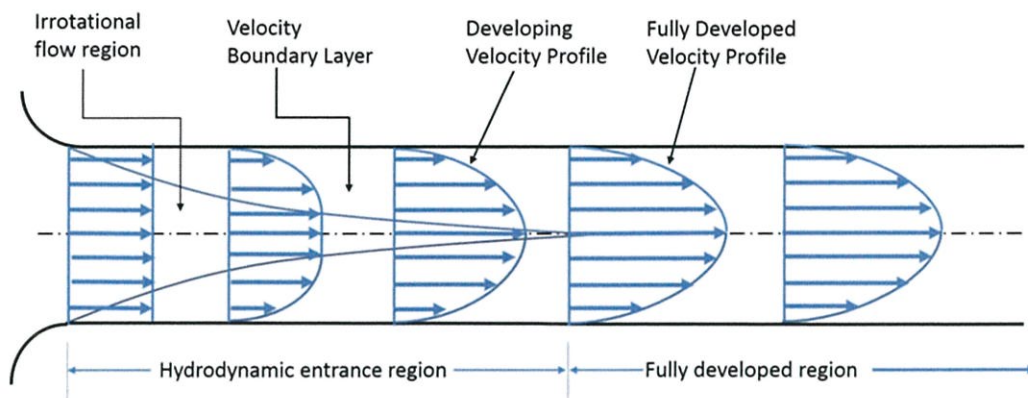
เมื่อค่า $\rho V \left(\frac{kg}{m^2 s} \right)$ เป็นค่าการไหลของสสารต่อพื้นที่หน้าตัดของการไหล สำหรับในกรณีของก๊าซนั้น การเพิ่มความร้อนภายในท่อจะทำให้ก๊าซเกิดการขยายตัวด้วยความเร็ว V ที่เพิ่มขึ้น ค่าของ ρV จะไม่เปลี่ยนแปลงถ้าพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่ และโดยปกติจะถือว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด μ จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันอีกด้วย ส่วนค่าความหนืดเชิงจลนศาสตร์ ν ซึ่งมีค่า $\frac{\mu}{\rho}$ ในกรณีของก๊าซจะมีค่าแปรผกผันกับความดันซึ่งจะต้องระมัดระวัง

เมื่อ D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) เป็นดังสมการ 2.3

$$D_h = \frac{4A_c}{p} \quad (2.3)$$

เมื่อค่า A_c และ P เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปเปียกของหน้าตัดตามลำดับ

เลขเรย์โนลด์วิกฤติ Re_c ของการไหลภายในท่อที่พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์แล้ว คือเลขเรย์โนลด์ของการไหลที่เปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเปลี่ยนเป็นการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่า $Re_c = 2300$ หรืออยู่ในช่วงระหว่าง 2000 – 4000 โดยประมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนในการไหล ความขรุขระภายในท่อที่ไหล หรือรูปทรง และสภาพบริเวณทางเข้า ส่วนเลขเรย์โนลด์ที่ต่ำกว่า 2000 ไม่ว่าท่อจะมีความยาวมากเพียงใด การไหลก็จะไม่เปลี่ยนแปลงไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน จะยังคงรักษาสภาพการไหลแบบเป็นชั้น หรือการไหลแบบราบเรียบต่อไป โดยรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นการกระจายความเร็วที่พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์การกระจายความเร็วจะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ



รูปที่ 2.2 การไหลอย่างสมบูรณ์ภายในท่อกลม

แต่สำหรับการไหลภายในท่อผิวเรียบ เลขเรย์โนลด์วิกฤติของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_D > 4000$ และความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวเข้าสู่ช่วงสมบูรณ์หาได้จากสมการ

$$\left(\frac{L_e}{D}\right)_{turb} \approx 4.4 Re_D^{1/6} \quad (2.4)$$

2.2.4 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor) ของ Moody หรือ Darcy ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติมีนิยามว่า

$$f_{Darcy} \equiv \frac{\left(\frac{\Delta p}{L}\right)D}{\rho\mu_0^2/2} \quad (2.5)$$

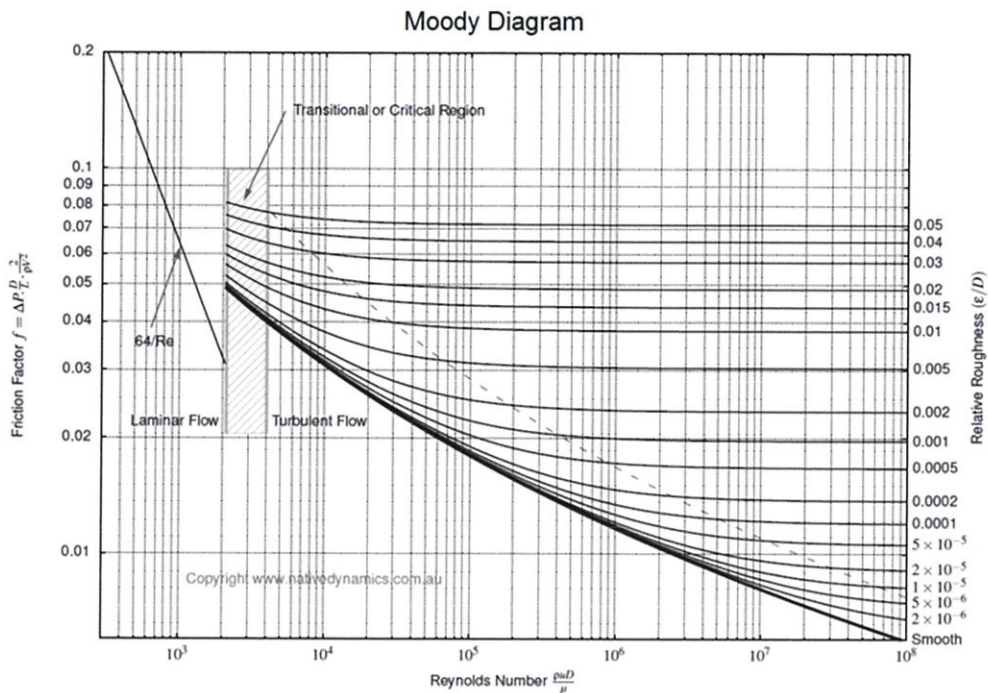
เมื่อค่า L คือช่วงความยาวที่วัดค่าความดันตกคร่อม

สหสัมพันธ์สำหรับการไหลผ่านพื้นผิวเรียบในช่วงของเลขเรย์โนลด์สูงๆ การพัฒนาของ Petukhov สามารถแสดงเป็นสมการ 2.6 ได้ดังนี้

$$f = (0.79 \ln Re_D - 1.64)^{-2} \quad (2.6)$$

ในช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่ $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$

และตารางแสดงความสัมพันธ์ของตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์หรือ Moody diagram สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลแบบสมบูรณในท่อกลม

2.2.5 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

2.2.5.1 วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน

วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน แบ่งออกได้เป็น

- 1) การนำความร้อน
- 2) การพาความร้อน
- 3) การแผ่รังสี

การนำความร้อน หมายถึง ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่

การพาความร้อน หมายถึง กระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล ในอุปกรณ์ความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม โดยมากการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุ มักจะมีอิทธิพลมากกว่าการถ่ายเทความร้อนภายในตัวของไหลเอง ในที่นี้ จึงจะกล่าวถึงการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าว การพาความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งจากการไหลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเนื่องจากความ

แตกต่างของอุณหภูมิ หรือความหนาแน่น และการไหลที่เกิดขึ้นจากบีบหรือพัดลม เป็นต้น ซึ่งแบบแรกจะเรียกว่า การพาความร้อนตามธรรมชาติ แบบหลังจะเรียกว่า การพาความร้อนด้วยการบังคับ

การแผ่รังสี วัตถุทุกชนิดจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาว และความเข้มค่าหนึ่งจากพื้นผิวอยู่ตลอดเวลา โดยความยาวและความเข้มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน หากวัตถุนั้นดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ ก็จะได้รับพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้เรียกว่า การแผ่รังสี

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน สามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการคงที่ และกระบวนการไม่คงที่ กระบวนการคงที่หมายถึง ในการถ่ายเทความร้อน การกระจายอุณหภูมิภายในตัววัตถุและปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ส่วนในกระบวนการไม่คงที่ ปริมาณเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

2.2.5.2 สภาวะการถ่ายเทความร้อน

เมื่อของไหลที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอไหลเข้าไปในท่อที่มีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขีดผิวของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่ โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิว (T_s) คงที่ หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิว (q_s'') คงที่ สภาวะพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (Thermally fully developed condition) ก็เกิดขึ้น

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ถ้า $Pr > 1$ การพัฒนาชั้นขีดผิวเชิงความเร็วจะขยายตัวเร็วกว่าชั้นขีดผิวเชิงความร้อน และกลับกันถ้า $Pr < 1$ และสำหรับอากาศการพัฒนาชั้นขีดผิวเชิงความเร็วและชั้นขีดผิวเชิงความร้อนจะใกล้เคียงกัน และจากการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ Pr ซึ่งอาจจะประมาณได้ว่า $L_{e,th} / D \approx 10$

ฟลักซ์ความร้อน q_s'' ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (2.7)$$

โดยที่ T_s คืออุณหภูมิพื้นผิว

T_m คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

ฟลักซ์ความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างกันรวมทั้งหมดระหว่างผนังกับของไหล ซึ่ง h คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาบางครั้งเรียกว่าการนำผ่านฟิล์ม เพราะความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลที่บริเวณผิวของผนัง ค่า T_m จะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการไหลนั่นคือ dT_m / dx จะไม่เป็นศูนย์ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ T_m จะเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหล x ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนจากผิวสู่ของไหล

2.2.5.3 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างชั้นขีดผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของของไหลต้องเปลี่ยนแปลงตามระยะ x ซึ่งสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อนของอุณหภูมิจะไม่เกิดขึ้น

เลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิ เพื่อให้ได้เงื่อนไขของสภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

เมื่อกำหนดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิแบบไร้มิติในรูป $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอยู่จริง อัตราส่วนนี้จะเป็นอิสระกับ x นั่นคือถึงแม้ว่า T ยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ x แต่ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิไร้มิตินี้จะไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งการไหลแบบนี้เรียกว่าการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (Thermally fully developed) และจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right] \quad (2.8)$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (2.8) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่องทางไหลอาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่หรือ T_s คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนกรณี T_s คงที่จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสถานะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

2.2.5.4 การพาความร้อน

หลักการพื้นฐานของการพาความร้อน

การพาความร้อน หมายถึง การถ่ายเทความร้อนในการอาศัยโดยอาศัยตัวกลางซึ่งเป็นของไหลเคลื่อนที่ ส่วนมากการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุมักจะสำคัญกว่าการถ่ายเทความร้อนภายในตัวของของไหลเอง ในที่นี้ จึงจะกล่าวถึงการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าว การพาความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งจากการไหลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ หรือความหนาแน่นและการไหลที่เกิดขึ้นจะส่งกำลัง เช่น ปุ่มหรือพัดลม เป็นต้น ซึ่งแบบแรกจะเรียกว่า การพาความร้อนตามธรรมชาติ และแบบหลังจะเรียกว่าการพาความร้อนด้วยการบังคับ

ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน

เมื่อของไหลที่มีอุณหภูมิมั่วเสมอไหลเข้าสู่ท่อที่มีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขีดผิวของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่ โดยอาจเป็นอุณหภูมิที่ผิว T_s คงที่ หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิว q_s'' คงที่ เพียงในที่นี่จะขอกกล่าว ภาวะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ สภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (Thermally fully developed condition) ก็เกิดขึ้น

โดยฟลักซ์ความร้อน q_s'' ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (2.9)$$

โดยที่ T_s คืออุณหภูมิพื้นผิว

T_m คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

พลັกซ์ความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ระหว่างผนังท่อ กับของไหล ซึ่ง h คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาบางครั้งเรียกว่าการนำผ่านฟิล์ม เพราะความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลบริเวณผิวของผนังท่อ ค่า T_m จะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการไหลนั่นคือ dT_m/dx จะไม่เป็นศูนย์ ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ T_m จะเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหล x ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนจากผิวสู่ของไหล

ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

การพาความร้อนระหว่างวัตถุกับของไหลเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ ประเภทของของไหล และโครงสร้างของชั้นผิวสัมผัส เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เราสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในรูปของฟังก์ชันปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้ในการพาความร้อนด้วยการบังคับ โดยการปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) [$W/(m^2 \cdot K)$] ความเร็วของกระแสหลัก (u_i) [m/s] ความยาวที่เป็นตัวแทนของวัตถุหรือระยะทาง (D) [m] ตัวอย่าง เช่น ในกรณีของการไหลในท่อ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน หรือ ในกรณีของการไหลบนแผ่นวัตถุ ได้แก่ ระยะทางจากขอบแผ่นวัตถุ เป็นต้น สัมประสิทธิ์ความหนืดของของไหล (μ) [$Pa \cdot s$] ความหนาแน่น (ρ) [kg/m^3] ความร้อนจำเพาะ (C_p) [$J/(kg \cdot K)$] สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) [$W/(m \cdot K)$] ซึ่งจากการทำ Dimensional analysis พบว่าปรากฏการณ์การพาความร้อนด้วยการบังคับ สามารถอธิบายด้วยฟังก์ชันของปริมาณต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{hD}{k}\right) = f\left\{\left(\frac{u_i D}{\mu/\rho}\right), \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)\right\} \quad (2.10)$$

พจน์ทั้ง 3 ในสมการข้างต้นเป็นปริมาณไม่มีหน่วยซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณทางฟิสิกส์หลายตัว มีชื่อเรียกว่า Nusselt number (Nu), Reynolds number (Re) และ Prandtl number (Pr) ตามลำดับ

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2.11)$$

$$Re = \frac{u_i D}{\mu/\rho} = \frac{u_i \mu}{\nu} \quad (2.12)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{u/\rho}{k/(C_p \mu)} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.13)$$

ในที่นี้ ν เป็นสัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ $\nu = \mu / \rho$ และ α เป็น Thermal diffusivity ($\alpha = k / (C_p \rho)$) ดังนั้น สมการที่ 2.14 จึงเขียนได้ว่า

$$Nu = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (2.14)$$

กล่าวคือ Nu สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันของ Re กับ Pr

ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน

ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน (TEF) คืออัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นที่ผิวทดสอบ (h) เทียบกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวเรียบ (h_0) ที่กำลังขับเดียวกันซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้รับ สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.15 และ 2.16

$$TEF = \frac{h}{h_0} \Big|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \Big|_{pp} = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (2.15)$$

$$TEF = \frac{(Nu / Nu_0)}{(f / f_0)^{1/3}} \quad (2.16)$$

- เมื่อ
- Nu คือ ค่าเลขนัสเซลล์จากการถ่ายเทความร้อน
 - Nu_0 คือ ค่าเลขนัสเซลล์จากท่อเปล่าผิวเรียบ
 - f คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทาน
 - f_0 คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานจากท่อเปล่าผิวเรียบ

2.3 การคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง

สำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่วงที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ การลดจำนวนกริดเซลล์และเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพื่อลดภาระงานให้น้อยลงในขณะที่ผลการทดลองยังมีความแม่นยำ จะใช้วิธีการคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง (Periodic flow) มาช่วย ซึ่งการวิเคราะห์การไหลลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อรูปทรงที่ใช้เป็นทรงเรขาคณิต โดยรูปแบบที่ต้องการหาค่าผลเฉลยของการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยธรรมชาติแล้วจะมีการซ้ำเป็นช่วงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงนี้สามารถแบ่งได้เป็นการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วและการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 การไหลช้าเป็นช่วงเชิงความเร็ว

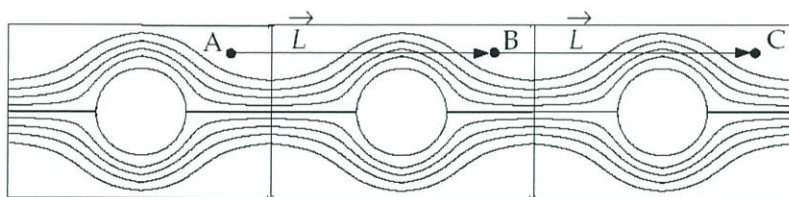
การไหลช้าเป็นช่วงเชิงความเร็วเป็นลักษณะการไหลเมื่อมีค่าความดันตกคร่อมเกิดขึ้นข้ามขอบเขตการไหลตามแนวทิศทางการไหลและเกิดขึ้นกับการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์แล้ว ลักษณะการไหลเช่นนี้มีการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตที่ซ้ำกันต่อกันไปตามแนวทิศทางการไหลและเกิดขึ้นซ้ำกันเป็นวงรอบเรื่อยไป สภาวะการไหลที่ช้าเป็นช่วงนี้เกิดขึ้นหลังจากมีช่วงของความยาวขาเข้าที่เพียงพอ โดยขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ของการไหลและรูปร่างทางเรขาคณิตของช่องทางไหล

2.3.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลช้าเป็นช่วง

สภาวะของการไหลช้าเป็นช่วงเกิดขึ้นดังกล่าวมานั้น เมื่อรูปแบบการไหลเกิดขึ้นซ้ำกันในช่วงการไหล L โดยมีค่าความดันตกคร่อมคงที่ในช่วงโมดูลนั้นๆ ตามแนวทิศทางการไหล นิยามของการไหลช้าเป็นช่วงเชิงความเร็วถูกกำหนดโดยค่าของความเร็วย่อยนั้นจะซ้ำกันโดยตัวมันเอง ดังสมการ 2.17

$$u_i(\vec{r}) = u_i(\vec{r} + \vec{L}) = u_i(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.17)$$

เมื่อ \vec{r} คือเวกเตอร์บอกตำแหน่ง และค่า \vec{L} คือเวกเตอร์ของความยาวที่ช้าเป็นช่วงของขอบเขตการไหลที่พิจารณา แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปทรงเรขาคณิตที่ช้าเป็นช่วง

จากรูปสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$u_A = u_B = u_C \quad \tilde{p}_A = \tilde{p}_B = \tilde{p}_C$$

$$v_A = v_B = v_C \quad p_B - p_A = p_C - p_B$$

2.3.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลช้าเป็นช่วง

สำหรับการไหลแบบมีความหนืดร่วมด้วยนั้น ค่าของความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นจะไม่ช้าเป็นช่วงตามนิยามของความเร็ว แต่ค่าของความดันตกคร่อมช่วงของการไหลหรือโมดูลนั้นๆ จะยังคงมีค่าเท่ากัน สามารถแสดงได้ดังสมการ 2.18

$$\Delta p = p(\bar{r}) - p(\bar{r} + \bar{L}) = p(\bar{r} + \bar{L}) - p(\bar{r} + 2\bar{L}) = \dots \quad (2.18)$$

ค่าเกรเดียนต์ของความดันเฉพาะที่สามารถแยกออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนของเกรเดียนต์ที่ซ้ำเป็นช่วง $\bar{\nabla} \tilde{p}(\bar{r})$ และส่วนของเกรเดียนต์ของการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น, $\beta \frac{\bar{L}}{|\bar{L}|}$ โดยแสดงได้ดังสมการ 2.19

$$\bar{\nabla} p(\bar{r}) = \beta \frac{\bar{L}}{|\bar{L}|} + \bar{\nabla} \tilde{p}(\bar{r}) \quad (2.19)$$

เมื่อค่า $\tilde{p}(\bar{r})$ คือความดันที่ซ้ำกันเป็นช่วง (Periodic pressure) และค่า $\beta|\bar{r}|$ คือส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดัน โดยที่ค่าความดันที่ซ้ำกันเป็นช่วงคือผลต่างของความดันทางด้านทางเข้ากับความดันที่ด้านทางออกที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น และส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดันเป็นผลของแรงที่กระทำต่อของไหลในสมการโมเมนตัม ซึ่งค่า β นั้นจะเป็นค่าที่ไม่ทราบมาก่อนและจะหาค่าได้จากการคำนวณซ้ำจนกระทั่งการไหลมีค่าของอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ตอนเริ่มต้น

2.3.2 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน

การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนตามแนวทิศทางการไหลนั้น สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับกรณีที่มีระบุดำพลั๊กความร้อนให้คงที่ที่ผนัง ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างขอบเขตที่ซ้ำเป็นช่วงจะมีค่าคงที่และมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มของความร้อนสุทธิจากขอบเขตของผนัง

เมื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นซ้ำกันเป็นช่วง สนามอุณหภูมิจะมีความคล้ายคลึงกับสนามของความดันในกรณีของการไหลเป็นช่วงเชิงความเร็ว โดยมีสมการ 2.20 ดังนี้

$$\frac{T(\bar{r} + \bar{L}) - T(\bar{r})}{L} = \frac{T(\bar{r} + 2\bar{L}) - T(\bar{r} + \bar{L})}{L} = \sigma \quad (2.20)$$

เมื่อค่า σ คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนได้ในเทอมของการเพิ่มความร้อนทั้งหมดภายในโดเมน, Q ดังสมการ 2.21

$$\sigma = \frac{Q}{\dot{m}c_p L} = \frac{T_{\text{bulk,exit}} - T_{\text{bulk,inlet}}}{L} \quad (2.21)$$

เมื่อค่า \dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวลที่กำหนดให้

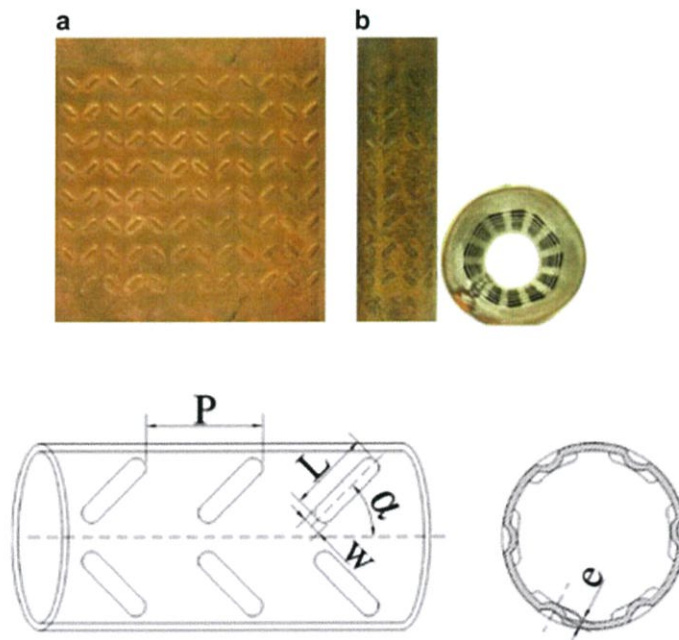
และค่า T_{bulk} มีนิยามโดย

$$T_{\text{bulk}} = \frac{\int_A T |\rho \bar{u} \cdot d\bar{A}|}{\int_A |\rho \bar{u} \cdot d\bar{A}|} \quad (2.22)$$

เมื่อ T_{bulk} อินทิเกรตตลอดพื้นที่หน้าตัดของโดเมนการไหลที่เข้าเป็นช่วง, A

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

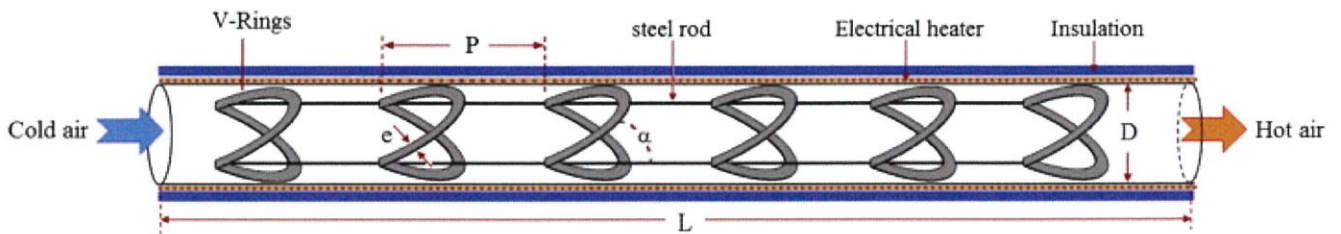
2.4.1 Meng et al. (2015) [1] ได้ทำการทดลองและศึกษาเชิงตัวเลขการถ่ายเทความร้อนและโครงสร้างการไหลในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีครีบริบตัววีแบบแยกกัน โดยในการศึกษาใช้น้ำเป็นของของไหลและศึกษาในช่วงเลขเรโนลด์ 15,000 – 60,000 และการศึกษาเชิงตัวเลขให้ผลศึกษาใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยเลขนัสเซิลท์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10% และค่าตัวประกอบเสียดทานมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 15% จากการศึกษาพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อครีบริบประมาณ 100 – 120% เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ค่าตัวประกอบความเสียดทานประมาณ 2.1 - 5.6 เท่า และอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 30 – 50% เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ใช้กำลังปั๊มเท่ากัน



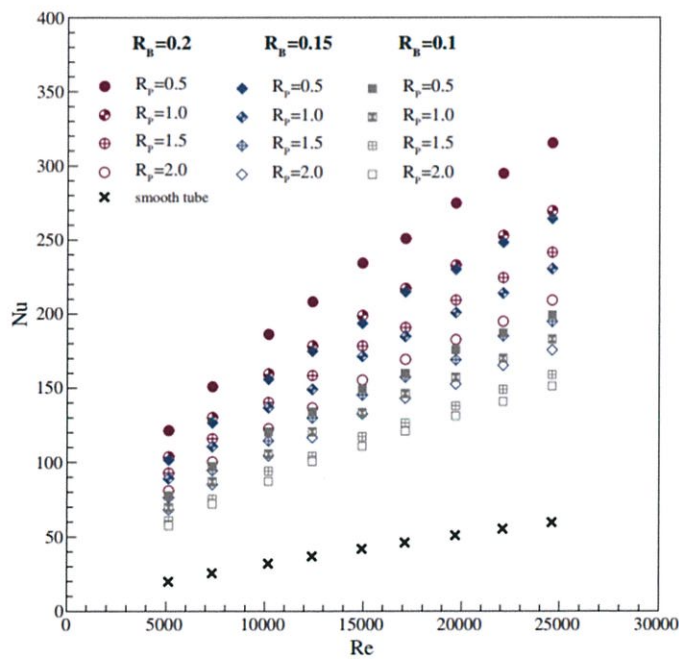
รูปที่ 2.5 ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีครีบริบตัววีแบบแยกกัน

2.4.2 Chingtuaythong et al. [2] ได้ทำการทดลองโดยใช้แหวนรูปตัววี (V-rings) ทำมุม 30 องศา ใส่เข้าไปในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้อากาศเป็นของของไหลและศึกษาในช่วงเลขเรโนลด์ 5000 – 25000 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของของไหลในท่อ เช่น การถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบความเสียดทาน โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความสูงของครีบริบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

(e/d) และ อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (p/d) จากผลการทดลองจะพบว่าค่าตัวเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบความเสียหาย จะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความสูงของครีบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (e/d) เพิ่มขึ้น แต่จะลดลง เมื่อค่าอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (p/d) เพิ่มขึ้น ดังนั้นจากการทดลองจะได้ค่าประสิทธิภาพที่ 1.63 เท่า เทียบกับท่อเปล่า ที่อัตราส่วนความสูงของครีบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เท่ากับ 0.1 และอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เท่ากับ 1.0

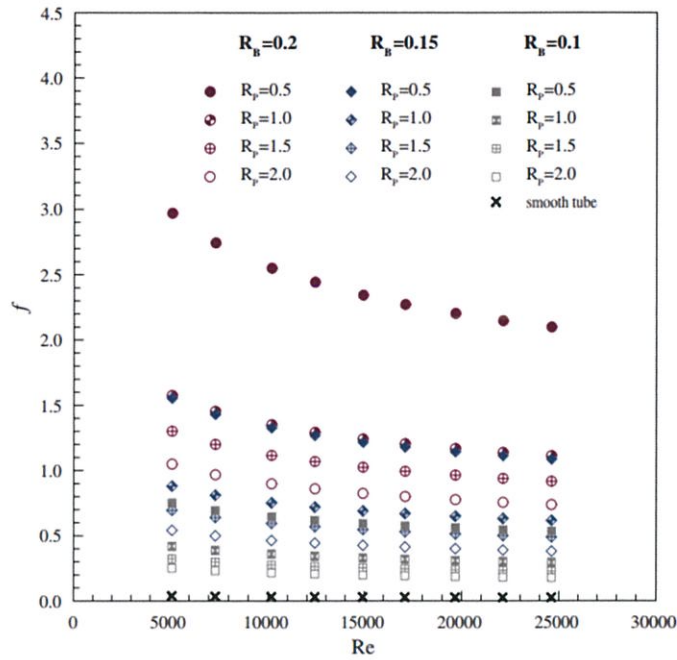


รูปที่ 2.6 แหวนรูปตัววี



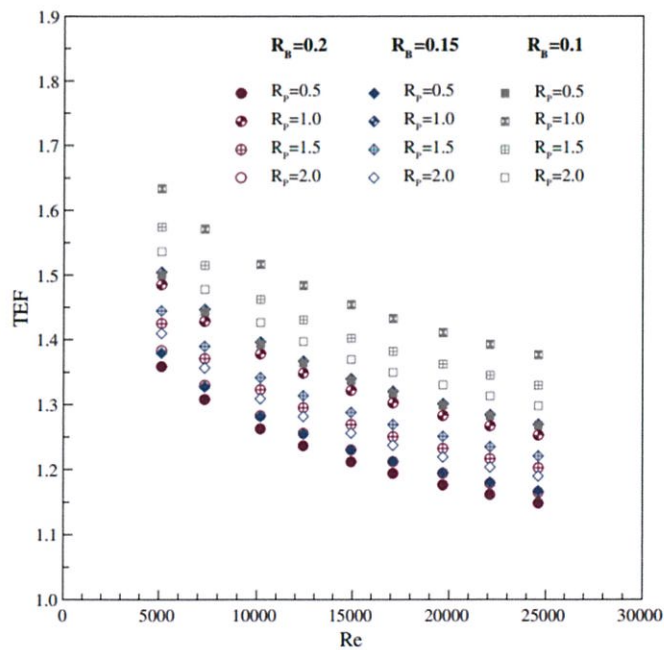
รูปที่ 2.7 กราฟค่าตัวเลขนัสเซิลท์ ที่มีการใส่แหวนรูปตัววี

จากรูปที่ 2.7 เป็นกราฟแสดงให้เห็นตัวเลขนัสเซิลท์ ที่มีการใส่แหวนรูปตัววี พบว่าสามารถให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อที่ราบเรียบ เนื่องจากการใส่แหวนรูปตัววี ทำให้เกิดการไหลกระแสการหมุนวนของการไหลในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 2.8 กราฟค่าตัวประกอบความเสียดทานที่มีการใส่แหวนรูปตัววี

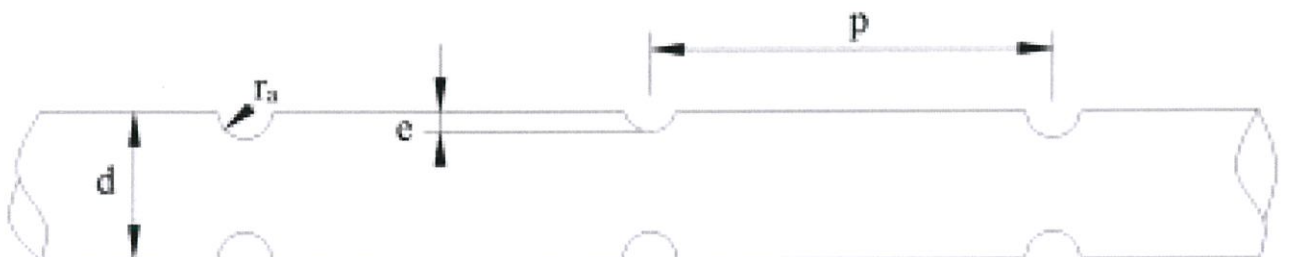
จากรูปที่ 2.8 กราฟแสดงค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมที่ใส่แหวนรูปตัววี พบว่าตัวประกอบความเสียดทาน ของท่อที่ใส่แหวนรูปตัววีมีค่าสูงกว่าท่อเรียบ และค่าตัวประกอบความเสียดทาน มีแนวโน้มลดลงเมื่อเลขเรโนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น



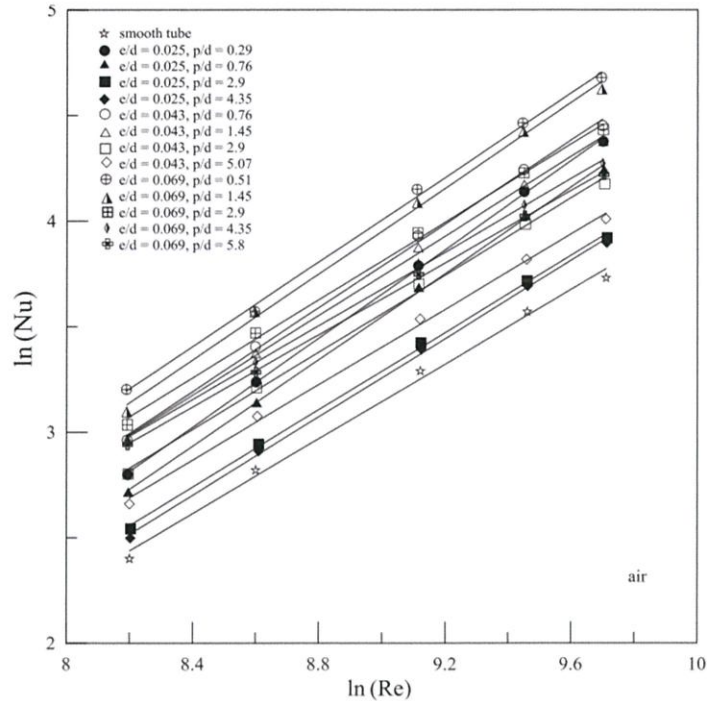
รูปที่ 2.9 กราฟค่าประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ใส่แหวนรูปตัววี

จากรูปที่ 2.9 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่มีการใส่แหวนรูปตัววี จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเลขเรโนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 1.63 เท่า เทียบกับท่อเปล่าที่อัตราส่วนความสูงของครีบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เท่ากับ 0.1 และอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เท่ากับ 1.0

2.4.3 Huang et al. [3] ได้ทำการทดลองโดยใช้การกรองเป็นช่วงๆในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้อากาศ, น้ำและสารละลาย ethylene glycol-water (33% EG by vol) เป็นของของไหล และศึกษาในช่วงเลขเรโนลด์ 3601 - 26025 โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความสูงของครีบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (e/d) และอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (p/d) จากผลการทดลองพบว่าค่าตัวเลขนัสเซิลท์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรโนลด์ นอกจากนี้ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ ยังเพิ่มขึ้นตามค่า e/d แต่จะลดลง เมื่อค่า p/d เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 การเซาะร่องท่อ



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงค่าตัวเลขนัสเซลท์ ที่มีการกดวงแหวนเป็นช่วงๆ

จากรูปที่ 2.11 เป็นกราฟแสดงให้เห็นตัวเลขนัสเซลท์ ที่มีการกดวงแหวนเป็นช่วงๆ พบว่าค่า ตัวเลขนัสเซลท์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรโนลด์และค่า e/d แต่จะลดลง เมื่อค่า p/d เพิ่มขึ้น

2.5 แนวทางการศึกษาวิจัย

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นเกี่ยวกับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบความเสียดทานในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีการใส่แผ่นครีบริบรูปตัววี แหวนรูปตัววีและการกดท่อ เพื่อสร้างความปั่นป่วนให้กับการไหล โดยมีการปรับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น อัตราส่วนความสูงของครีบริบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และมุมปะทะ เมื่อติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนแล้วจะทำให้เพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทาน ซึ่งส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ได้มีค่าต่ำ ดังนั้นด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นสาเหตุหลักในการศึกษาวิจัยต่อไปโดยทำการกดร่องแบบวงแหวนภายในท่อกลม และทำการปรับปรุงรูปแบบแหวนเพื่อเป็นการลดค่าตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งงานวิจัยนี้จะเน้นการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนบล็อกการไหล, อัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และมุมปะทะ เพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทาน และเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของของไหลให้เพิ่มมากขึ้น และเพื่อเป็นองค์ความรู้ใหม่และแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดและลดต้นทุนในการผลิตและนำไปสู่การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์ไม่มากนักแก่ผู้ที่สนใจ และแก่อุตสาหกรรม ทำให้มีการใช้พลังงานและทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ สามารถลดต้นทุนในการผลิตในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นประโยชน์โดยตรงในเชิงเศรษฐกิจ สังคม และ สิ่งแวดล้อม

บทที่ 3

การออกแบบแบบจำลองและขั้นตอนการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบแบบจำลอง อุปกรณ์ และขั้นตอนการศึกษา โดยจะอธิบายถึงการปรับปรุงรูปแบบของวงแหวนรูปตัววีที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งรูปแบบวงแหวนรูปตัววีได้ถูกปรับปรุงรูปทรงในหลากหลายลักษณะเพื่อวิเคราะห์หารูปทรงที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงค่าการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเป็นหลัก การปรับปรุงรูปทรงของวงแหวนรูปตัววีได้กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์หลักๆ ดังนี้ อัตราส่วนบล็อกการไหล (BR), อัตราส่วนพิตช์ (PR), องศาของมุมปะทะ (α) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววี (w)

3.1 รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีที่ใช้ในการศึกษา

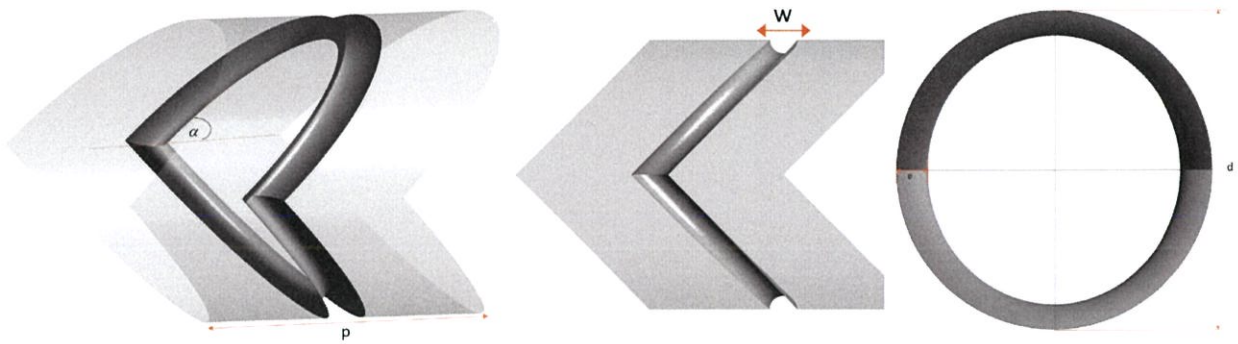
3.1.1 วงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้เริ่มต้นจากการศึกษาวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม คือ วงแหวนรูปตัววีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรง โดยได้กำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อก (BR) = $e/d = 0.1$
2. อัตราส่วนพิตช์ (PR) = $p/d = 1.0$
3. องศาของมุมปะทะ (α) = 45°
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววี (w) = 0.05 m
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d) = 0.05 m หรือเท่ากับ 50 mm

โดยที่ e คือ ความสูงครีบ, p คือ ระยะห่างระหว่างวงแหวน, w คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววี

เมื่อนำวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐานกวดบนท่อกลมผิวเรียบจะสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อคดงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน

จากการศึกษาการก่อก่อเป็นวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐานพบว่า สามารถเหนี่ยวนำให้ของไหลเกิดการไหลแบบหมุนวนและเกิดการทำลายชั้นขอบเขตของความร้อน (Thermal boundary layer) จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังท่อกลมมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ แต่อย่างไรก็ตามก่อก่อเป็นวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐานจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นมาก แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้อยู่ถือว่าได้ผลไม่ด้นัก จึงเป็นสาเหตุที่ต้องทำการปรับปรุงรูปทรงของวงแหวนรูปตัววีต่อไป ซึ่งคาดหวังว่าจะลดค่าตัวประกอบเสียดทานได้และมีสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงขึ้น รายละเอียดดังหัวข้อถัดไป

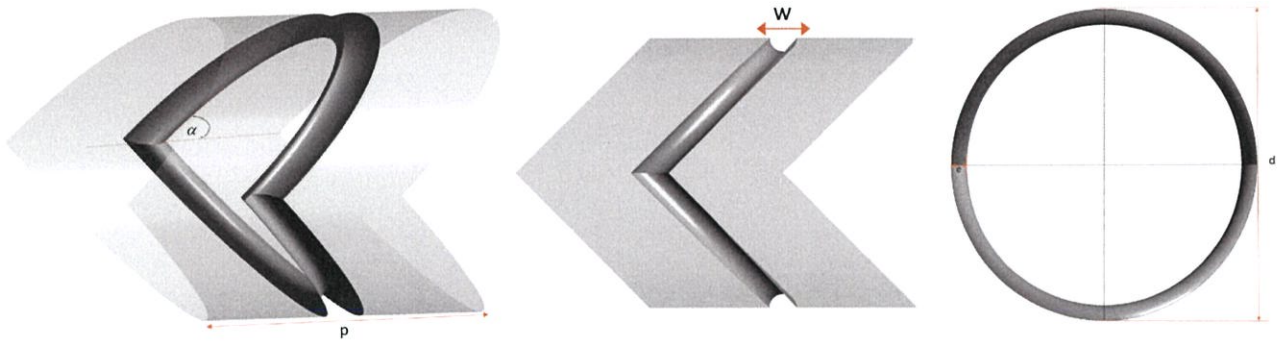
3.1.2 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1

การปรับปรุงรูปทรงของวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 1 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมลงจากแบบมาตรฐาน โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนบล็อกการไหล (Blockage Ratio, BR) ซึ่งกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อก (BR) = $e/d = 0.05, 0.15$
2. อัตราส่วนพิตช์ (PR) = $p/d = 1.0$
3. องศาของมุมปะทะ (α) = 45°
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววี (w) = 0.05 m
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d) = 0.05 m หรือเท่ากับ 50 mm

โดยที่ e คือ ความสูงครีบ, p คือ ระยะห่างระหว่างวงแหวน, w คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววี

การปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 1 ที่จะสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อกดวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1

เมื่อได้ทำการศึกษาวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 พบว่าการใส่วงแหวนรูปตัววีสามารถเพิ่มการไหลหมุนวนแบบปั่นป่วนภายในท่อได้ จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังท่อกลมมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อเปรียบเทียบกับการใส่วงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐานพบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้มีค่าลดลงเมื่อลดอัตราส่วนบล็อกการไหล แต่อย่างไรก็ตามการกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 นี้ ทำให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ยังไม่มากพอและไม่เหมาะกับการนำไปใช้งาน จึงมีความจำเป็นต้องทำการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีนี้เพิ่มเติม

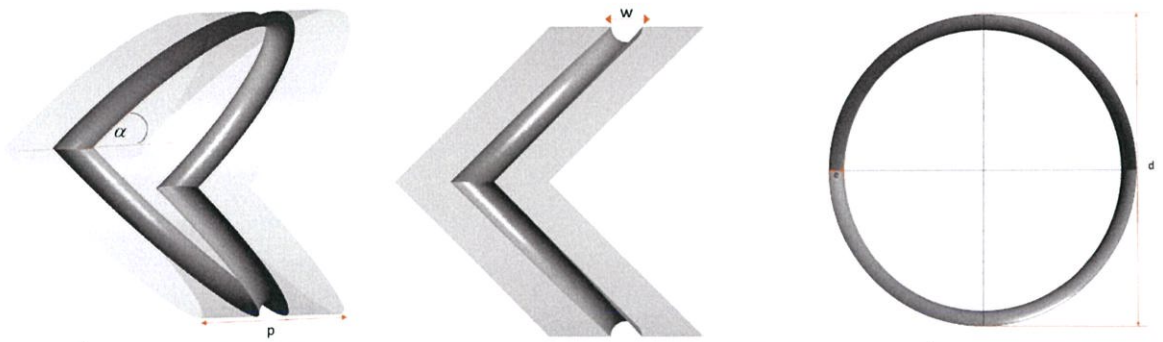
3.1.3 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2

การปรับปรุงรูปทรงของวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 2 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มการไหลหมุนวนแบบปั่นป่วนภายในท่อจากแบบมาตรฐานและแบบปรับปรุง 1 โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนพิทช์ (Pitch Ratio, PR) โดยกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อก (BR) = $e/d = 0.05$
2. อัตราส่วนพิทช์ (PR) = $p/d = 0.5, 1.5$
3. องศาของมุมปะทะ (α) = 45°
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววี (w) = 0.05 m
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d) = 0.05 m หรือเท่ากับ 50 mm

โดยที่ e คือ ความสูงครีป, p คือ ระยะห่างระหว่างวงแหวน, w คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววี

การปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 2 สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อดวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2

เมื่อได้ทำการศึกษาวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 พบว่าการกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 สามารถเพิ่มการไหลหมุนวนแบบปั่นป่วนภายในท่อได้ จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังท่อกลมมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อเปรียบเทียบกับท่อดวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน และแบบปรับปรุงที่ 1 พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่าวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 และแบบมาตรฐาน แต่ยังไม่มากพอที่จะนำไปใช้จริง จึงมีความจำเป็นต้องทำการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีนี้เพิ่มเติมเพื่อให้มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้น

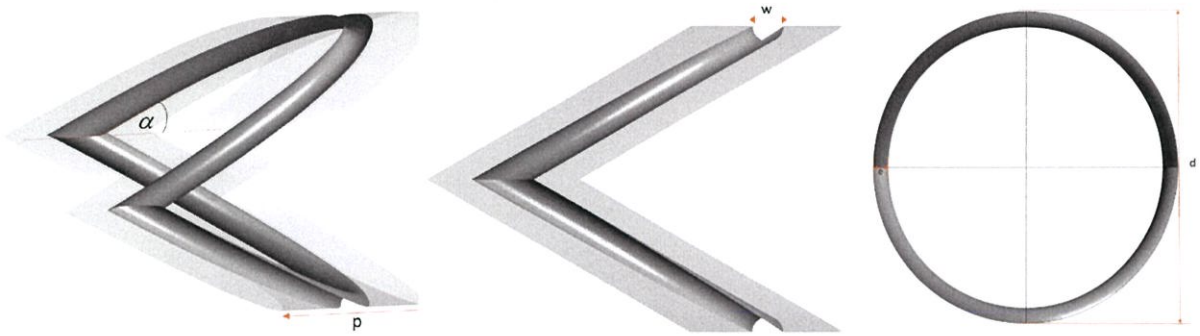
3.1.4 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3

การปรับปรุงรูปทรงของวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 3 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทานให้น้อยกว่าแบบปรับปรุงที่ 2 โดยการเปลี่ยนองศาของมุมปะทะ (α) โดยตัวแปรต่างๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อก (BR) = $e/d = 0.05$
2. อัตราส่วนพิตช์ (PR) = $p/d = 0.5$
3. องศาของมุมปะทะ (α) = $20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววี (w) = 0.05 m
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d) = 0.05 m หรือเท่ากับ 50 mm

โดยที่ e คือ ความสูงครีป, p คือ ระยะห่างระหว่างวงแหวน, w คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววี

การปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 3 สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อคดวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3

จากการศึกษาวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 พบว่าการคดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีภายในท่อสามารถทำให้การไหลหมุนวนแบบปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นและเกิดการกระจายอุณหภูมิของของไหลไปสู่บริเวณผิวท่อมากขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังท่อกลมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และการใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 นี้ยังส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 ตามที่ได้คาดหวังไว้

3.2 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์ปัญหา

ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการหลักๆ ทั้งหมด 4 สมการที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบไปด้วยเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ย (Nu), ตัวประกอบความเสียดทาน (f), ตัวประกอบของการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน (TEF) และเลขเรย์โนลด์ (Re) ที่อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละสมการมีดังนี้

เลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ย

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_s dA \quad (3.1)$$

ตัวประกอบความเสียดทาน

$$f = \frac{(\Delta p) D}{2 \rho L u_0^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ Δp คือค่าความดันตกคร่อม และ L คือความยาวหนึ่งช่วงการไหล

ตัวประกอบของการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน

$$TEF = \frac{h}{h_0} \Big|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \Big|_{pp} = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (3.3)$$

เลขเรย์โนลด์

$$Re = \rho u_0 D / \mu \quad (3.4)$$

การวิเคราะห์หารูปแบบวงแหวนรูปตัววีที่เหมาะสมจะเปรียบเทียบผลจากค่าที่ได้จากตัวแปรหลักๆ ข้างต้น เพื่อเป็นตัวชี้วัดรูปแบบที่เหมาะสม โดยหลักการวิเคราะห์เบื้องต้นคือ ค่าเลขนัสเซลล์ท์หรือค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต้องมีค่าสูง ค่าตัวประกอบเสียดทานต้องมีค่าต่ำ และค่าตัวประกอบของการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนต้องมีค่าสูง ซึ่งค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะเป็นตัวชี้วัดท้ายสุดที่จะบ่งชี้ได้ว่าวงแหวนรูปตัววีนี้เหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่

3.3 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

สำหรับการคำนวณการไหลในสามมิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

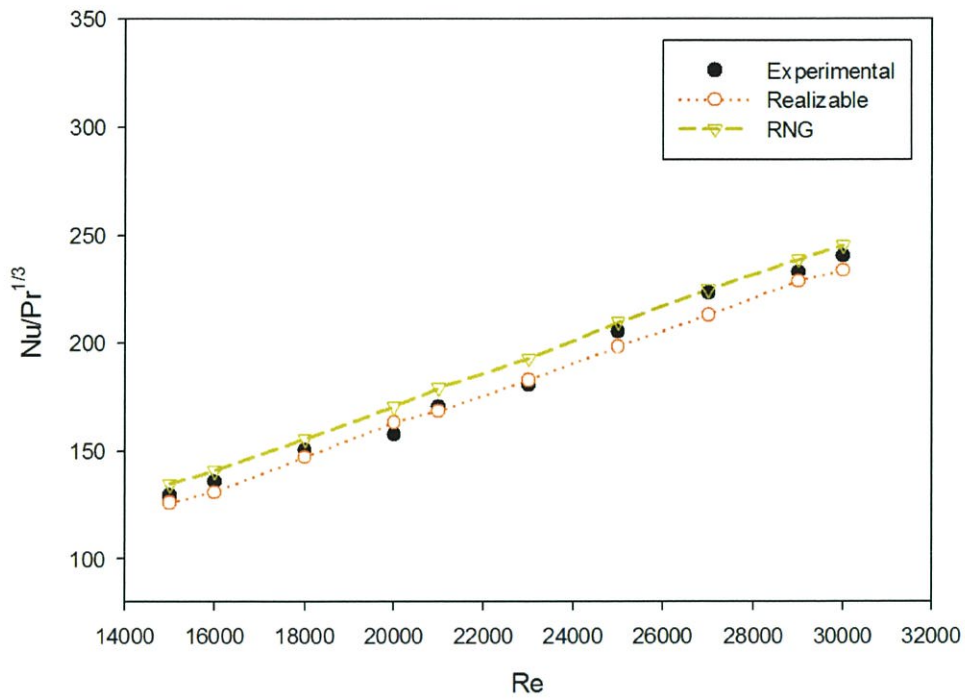
1. ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ
2. ใช้วิธีการคำนวณแบบปริมาตรสี่เหลี่ยมกับระเบียบวิธี SIMPLE
3. คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า
4. ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 4000 - 15,000
5. กำหนดให้ผนังของท่อกลมมีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่ 600 W/m^2
6. อัตราส่วนพิตช์ (Pitch Ratio, PR) เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5
7. อัตราส่วนการบดบังการไหล (Blockage Ratio, BR) เท่ากับ 0.05, 0.1 และ 0.15
8. มุมปะทะ (α) เท่ากับ 20° , 30° , 45° , 60°

3.4 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข

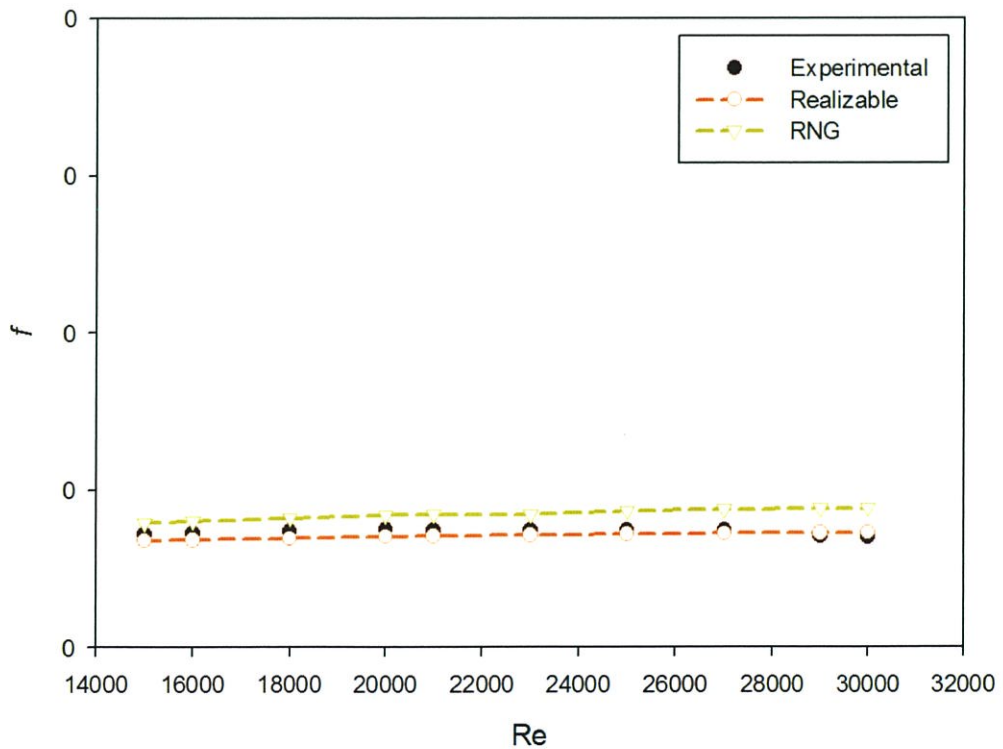
3.4.1 การตรวจสอบแบบจำลองปั่นป่วน

ก่อนที่จะนำแบบจำลองเชิงตัวเลขไปใช้ในการหาคำตอบในการทดลองนั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองปั่นป่วนที่ใช้เสียก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลองปั่นป่วนที่ใช้มีความถูกต้องแม่นยำ โดยเลือกเปรียบเทียบผลของแบบจำลองปั่นป่วนกับงานวิจัยในอดีตของ J-meng^[1] และใช้ ท่อกลมเป็นรูป capsule ที่มีอัตราส่วน Blockage Ratio

(BR) = 0.02 และอัตราส่วน Pitch Ratio (PR) = 0.32 เปรียบเทียบกับแบบจำลองปั่นป่วน $k-\varepsilon$ ในรูปแบบต่างๆ (ใช้กระบวนการวิธีแบบ QUICK) โดยผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังรูป 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 $Nu/Pr^{1/3}$ จากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\varepsilon$ และผลการทดลองของ J-meng^[1]



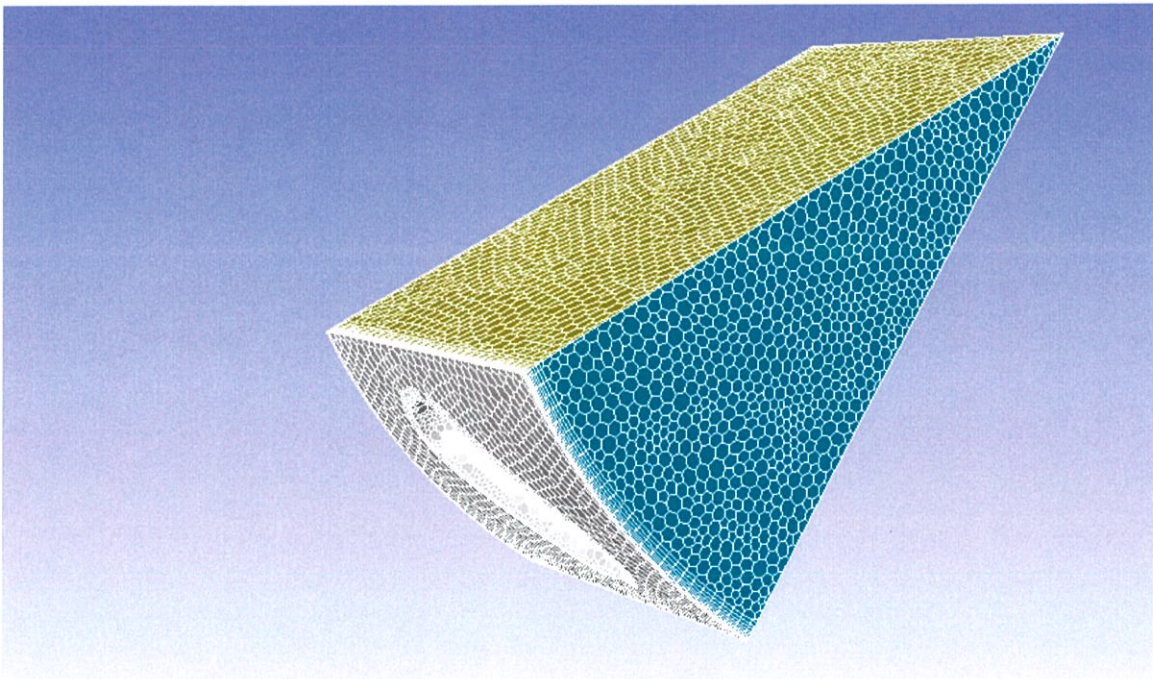
รูปที่ 3.6 ตัวประกอบความเสียดทานจากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\varepsilon$ และผลการทดลองของ J-meng^[1]

ซึ่งการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและผลจากการทดลองของ J-meng^[1] พบว่าแบบจำลองปั่นป่วน Realizable $k-\epsilon$ ให้ผลของเลขนัสเซลล์ท์และตัวประกอบเสียดทานใกล้เคียงกับการผลทดลองของ J-meng^[1] มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองปั่นป่วนอื่นๆ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของเลข $Nu/Pr^{1/3}$ และตัวประกอบเสียดทานเทียบกับผลทดลองอยู่ที่ 6.64% และ 9.5 % ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ดังนั้นแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้จึงเหมาะสมกับการนำไปทดลองต่อไป

3.5. การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม

การตรวจสอบหาจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมโดยการเทียบผลกับการทดลองของ J-meng^[1] ที่ $Re=30,000$

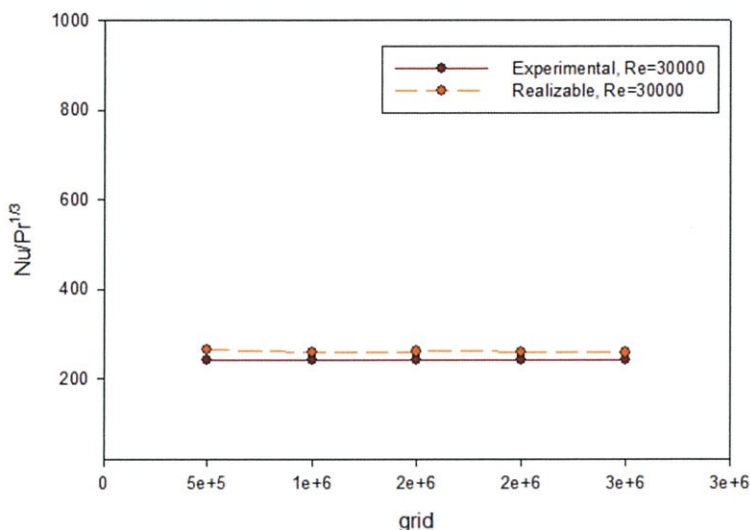
ลักษณะการสร้างรูปแบบกริดและขอบเขตการไหลในงานวิจัยนี้ได้แสดงดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 รูปแบบกริดและขอบเขตการไหลของท่อกลมที่มีการใส่วงแหวนรูปตัววี

รูปแบบกริดที่ใช้สำหรับงานวิจัยที่ ได้ใช้การแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) ซึ่งพิจารณาบริเวณที่ติดผนังให้มีจำนวนกริดที่หนาแน่นโดยการอัดกริดเป็นชั้น Layer และบริเวณที่ห่างออกไปจากผนังก็มีจำนวนกริดเบาบางลงและตีกริดเป็นทรง polyhedral ส่วนการหาผลกระทบของจำนวนกริดที่มีผลต่อคำตอบนั้น ได้ทำการศึกษาโดยใช้จำนวนของกริดที่แตกต่างกันจำนวน 5 ช่วง คือ ที่ 50,432, 100,152, 151,708 201,554 และ 251,599 ตามลำดับ ซึ่งการทดสอบได้ใช้วิธีการคำนวณหาผล

เฉลยแบบ SIMPLE และใช้ระเบียบวิธีการคำนวณแบบ QUICK สำหรับการคำนวณ Momentum, Turbulent และ Energy โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังหัวข้อที่ 3.3 เงื่อนไขการลู่เข้าหาคำตอบของทุกค่าอยู่ที่ 10^{-6} ยกเว้นสมการ Energy ซึ่งอยู่ที่ 10^{-9} การหาจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมจะดูจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกริดที่ $Re = 30000$ ผลการทดสอบได้ดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า $Nu/Pr^{1/3}$ ที่ $Re=30000$

จากรูปชี้ให้เห็นว่าการสร้างกริดที่จำนวน 100,152, 151,708, และ 201,554 ให้ค่า $Nu/Pr^{1/3}$ ที่ใกล้เคียงกันและมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10% ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากผลทดสอบจำนวนกริดจากทั้งค่า Nu และ f แล้ว จึงได้เลือกใช้จำนวนกริดอยู่ในช่วง 100,000 ในการศึกษา เนื่องจากผลที่ได้จากการทดสอบจำนวนกริดอยู่ในค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้และไม่จำเป็นต้องใช้จำนวนกริดที่มากกว่านี้เพื่อลดภาระการคำนวณให้น้อยลงจากการเลือกใช้จำนวนกริดที่เหมาะสม

3.6 วิธีการดำเนินการศึกษา

- 3.6.1 ทำการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลในท่อที่มีการก่ดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววี
- 3.6.2 กำหนดลักษณะรูปร่างของแหวนรูปตัววีโดยอ้างอิงขนาดและรูปแบบพื้นฐานจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ทำการตรวจสอบแบบจำลองที่เหมาะสมเทียบกับผลการทดลองของนักวิจัยในอดีตที่มีการก่ดท่อรูปแบบต่างๆ
- 3.6.3 สร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลพร้อมกับเลือกขนาดและจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสม

- 3.6.4 คำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการไหลสามมิติ โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ Re, PR, BR และ มุมปะทะ โดยจัดวางแหวนรูปตัววีแบบชี้ทวนกระแสการไหล
- 3.6.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณโดยเปรียบเทียบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ด้วยการสร้างกราฟเปรียบเทียบ
- 3.6.6 สรุปผลการวิจัยและให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

บทที่ 4

ผลการศึกษา

จากการศึกษา คำนวณวิจัยพบว่า การก่อก่อเป็นวงแหวนรูปตัววีในรูปทรงต่างๆ สามารถช่วยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าตัวประกอบเสียดทานยังคงมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีรูปแบบต่างๆ ซึ่งในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการศึกษาด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหล ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม สำหรับการก่อก่อเป็นวงแหวนรูปตัววีแบบต่างๆ ซึ่งจะพิจารณาในส่วนของ การปรับปรุงรูปทรงวงแหวนรูปตัววีเป็นหลัก

การแสดงผลการศึกษาจะแสดงด้วยรูปภาพหรือกราฟ เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายต่อการเปรียบเทียบที่ชัดเจน ซึ่งจะแสดงผลและอภิปรายผลที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการไหลเมื่อก่อก่อวงแหวนรูปตัววีรูปแบบต่างๆ ทั้งแบบมาตรฐานและแบบปรับปรุงใหม่ของวงแหวนรูปตัววีในรูปทรงต่างๆ การกระจายอุณหภูมิเมื่อก่อก่อเป็นวงแหวนรูปตัววีในรูปทรงต่างๆ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ (Nu/Nu_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ และอภิปรายผลเปรียบเทียบความแตกต่างและสรุปผลแต่ละรูปแบบของวงแหวนรูปตัววีในรูปทรงที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น

4.1 วงแหวนรูปตัววีแบบต่างๆ

4.1.1 วงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน

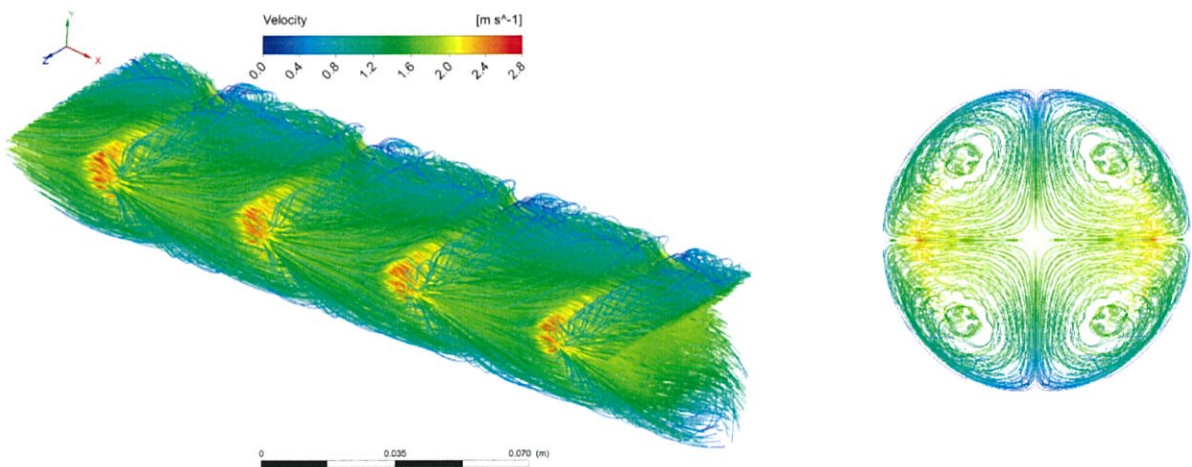
รูปแบบแรกที่ได้ทำการศึกษาคือก่อก่อเป็นวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐานที่ผิวของท่อกลม โดยจัดวางปลายของตัววีแบบชี้ทวนกระแสการไหล โดยกำหนดอัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$, อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.1$, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร ท่อกลมก่อก่อเป็นวงแหวนรูปตัววีแสดงได้ดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 ท่อคดวงแหวนตัววีแบบมาตรฐาน

เส้นกระแสการไหลในท่อคดวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน

ในส่วนของเส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปแบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลเมื่อมีการกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววี ดังแสดงไว้ในรูป 4.2

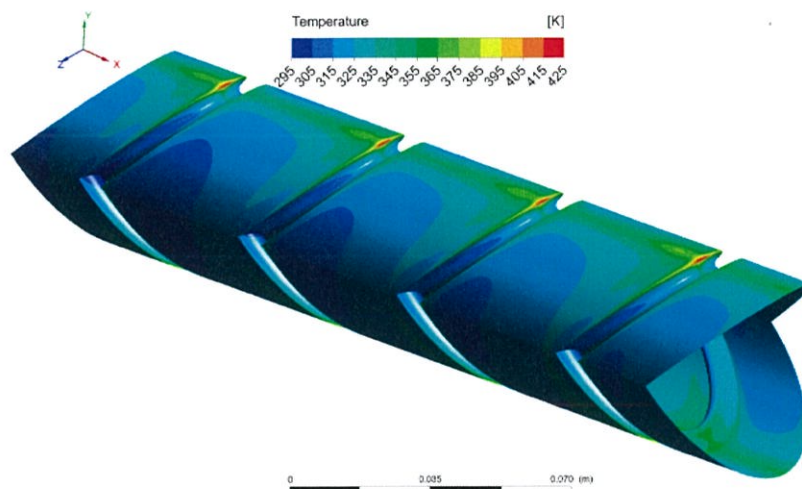


รูปที่ 4.2 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติท่อคดวงแหวนตัววีแบบมาตรฐาน

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนขึ้นสังเกตได้จากลักษณะการไหลเกิดการหมุนวนที่ด้านข้างของมุมของวงแหวนรูปตัววีแต่ยังไม่มากนักเนื่องจากกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนรูปกรวยภายในยังมีเส้นกระแสแบบเส้นตรงมากกว่าแบบหมุนวน

การถ่ายเทความร้อนในท่อคดงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน

การถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ ซึ่งจะแสดงให้เห็นดังรูป 4.3

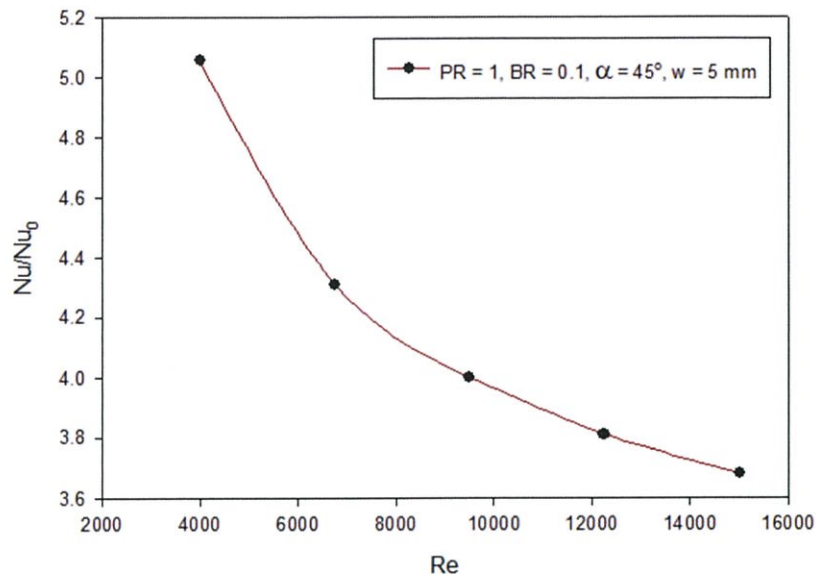


รูปที่ 4.3 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อกุดต่อเป็นท่อคดงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน

จากรูป 4.3 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการกุดต่อเป็นวงแหวนรูปตัววี $BR = 1.0$, $PR = 1.0$, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$ และ $Re = 4000$ เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อกุดต่อเป็นวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน ทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้นเป็นผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าความร้อนที่บริเวณผนังท่อได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ยังปรากฏคอนทัวร์สีแดงบริเวณด้านบนของท่อแสดงให้เห็นว่า บริเวณด้านบนของท่อยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อย จึงมีการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์เมื่อกุดต่อเป็นวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อคดงแหวนรูปตัววี ซึ่งพิจารณาที่ อัตราส่วนพิตช์ $PR = 1.0$, อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.1$, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000 - 15,000$ แสดงได้ดังรูป 4.4

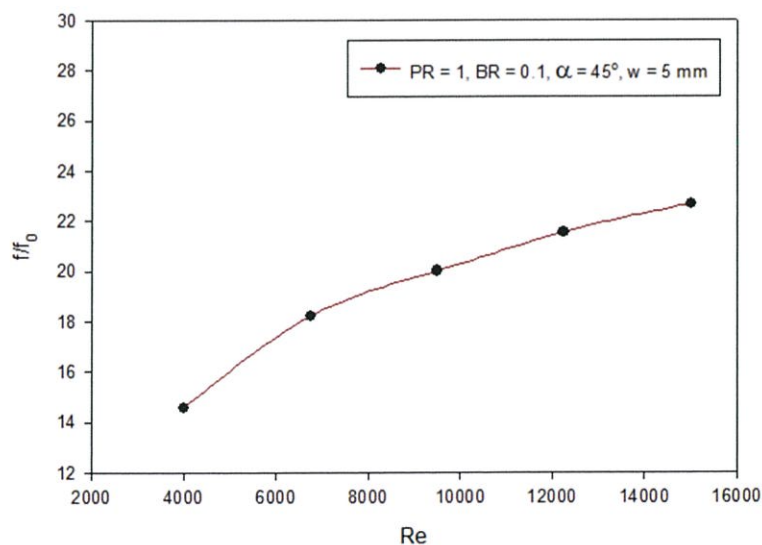


รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์อยู่ในช่วง 3.68 - 5.06 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ $Re = 4000 - 15,000$

อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อกดท่อวงแหวนตัววีแบบมาตรฐาน

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกดวงแหวนรูปตัววี ซึ่งพิจารณาที่ อัตราส่วนพิตช์ $PR = 1.0$, อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.1$, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000 - 15,000$ แสดงได้ดังรูป 4.5



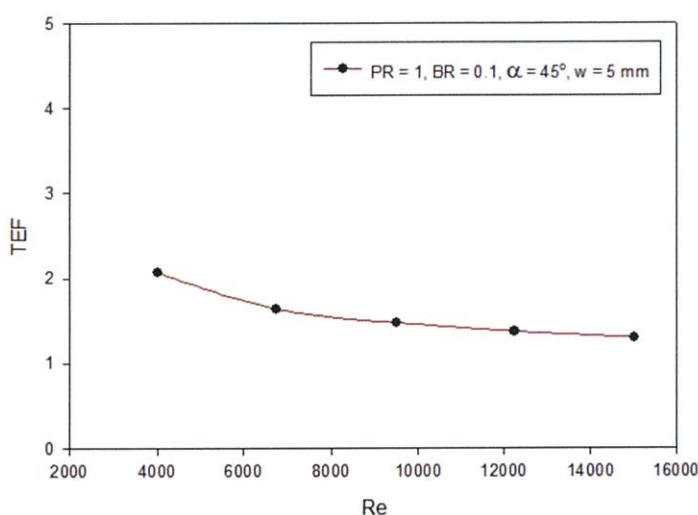
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) อยู่ในช่วง 14.59 - 22.68 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ $Re = 4000 - 15,000$

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) พบว่ามีความสัมพันธ์กันคือเมื่อกดท่อลงไปเป็นวงแหวนรูปตัววีทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นและค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ก็เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน การกดท่อวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐานถึงจะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าแต่ก็ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่สูงมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนร่วมด้วยและเพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้แหวนรูปตัววีได้อย่างเหมาะสมและคุ้มค่าหรือไม่

ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อกดท่อเป็นวงแหวนตัววีแบบมาตรฐาน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่ากับเลขเรย์โนลด์ (Re) เมื่อกดท่อวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐานในท่อกลมผิวเรียบได้แสดงไว้ดังรูป 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)

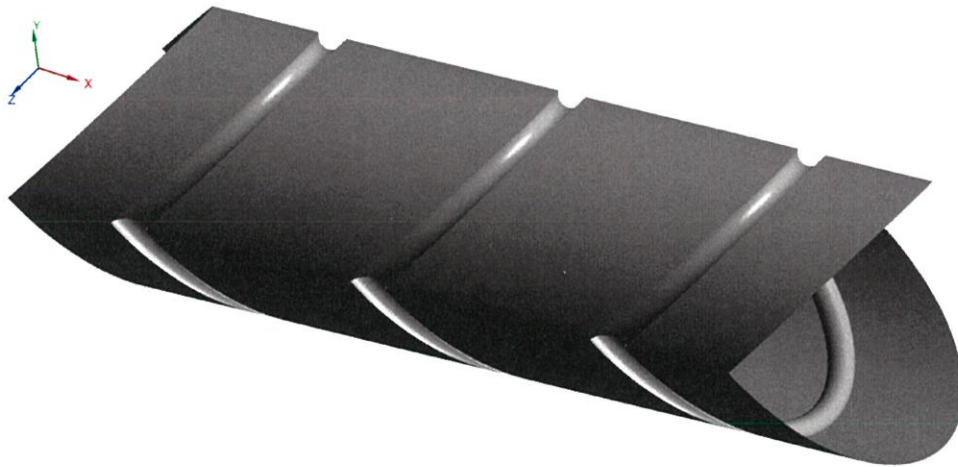
จากรูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่กดท่อเป็นวงแหวนตัววีแบบมาตรฐาน พบว่าที่ อัตราส่วนพิตช์ $PR = 1.0$, อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.1$, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000$ ให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดที่ 2.07

จากการพิจารณาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนพบว่าการกดท่อวงแหวนตัววีสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณผนังได้มากขึ้นแต่ยังไม่คุ้มกับการศึกษาและการลงทุนในทางอุตสาหกรรม เนื่องมาจากค่าตัวประกอบเสียดทานที่เพิ่มสูงขึ้นมาก ทำให้สมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้ดีกว่าท่อเปล่าผิวเรียบแบบธรรมดาเล็กน้อย ดังนั้นเราจึงต้องปรับปรุงรูปทรงของแหวนรูปตัววีเพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทานให้มีค่าลดลง เพื่อให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ด้วยหลักการนี้จึงเป็นเหตุผลหลักในการเลือกปรับปรุงแหวนรูปตัววีแบบต่างๆ

4.1.2 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1

รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 (อิทธิพล Blockage Ratio, BR)

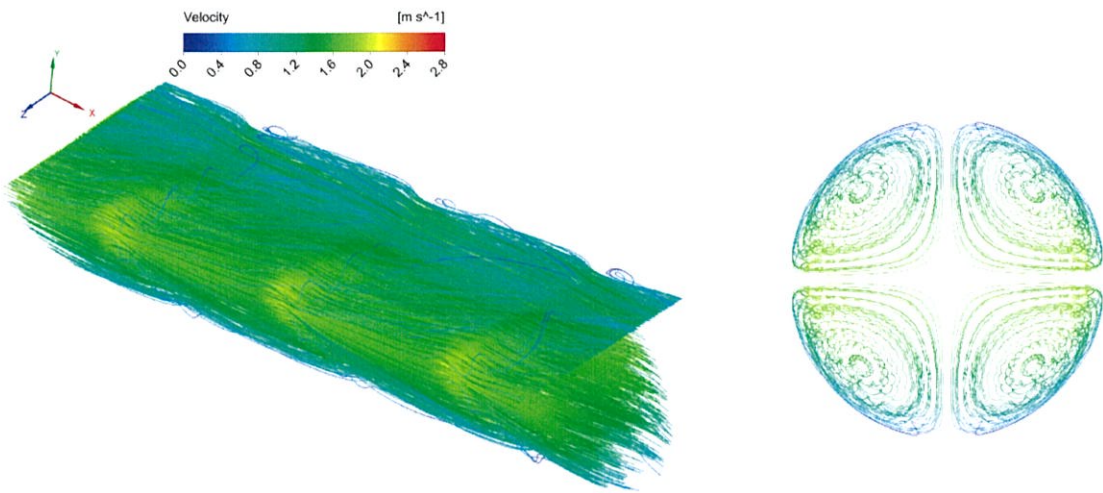
จากการศึกษาการก่อกวนเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบมาตรฐาน ทำให้ทราบว่าสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ แต่ยังมีปัญหาค่าตัวประกอบเสียดทานที่ยังสูง และการกระจายของอุณหภูมิยังไม่มากพอที่บริเวณด้านบนของวงแหวนรูปตัววี ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 1 คือ การเปลี่ยนอัตราส่วนบล็อกการไหล (Blockage Ratio, $BR = e/d$) ซึ่งคาดว่าจะเปลี่ยนพื้นที่ขวางการไหลได้ และช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานลงได้ จึงได้ทำการทดลองเปลี่ยนค่า BR ของวงแหวนรูปตัววีที่มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจากหัวข้อก่อนหน้านี้ไปเป็น $BR = 0.05, 0.15$ ทั้งสิ้น 2 ขนาด จากการศึกษาสรุปได้ว่าค่า BR ที่เหมาะสมที่สุดกับวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 คือ $BR = 0.05$ โดยให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่วง $1.62 - 2.28$ ที่ $Re = 4000 - 15,000$ ซึ่งสูงกว่า $BR = 0.15$ และวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐานด้วย ดังนั้นในการศึกษาตัวแปรอื่นๆของวงแหวนรูปตัววีจะยึดค่า $BR = 0.05$ เป็นหลักต่อไป ตัวอย่างดังรูป 4.7



รูปที่ 4.7 ท่อคดวงแหวนตัววีปรับปรุงแบบที่ 1

เส้นกระแสการไหลเมื่อก่อกวนเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 (อิทธิพล Blockage Ratio, BR)

เส้นกระแสการไหลเมื่อก่อกวนเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 จะแสดงในรูปแบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลภายในท่อดังแสดงไว้ในรูป 4.8

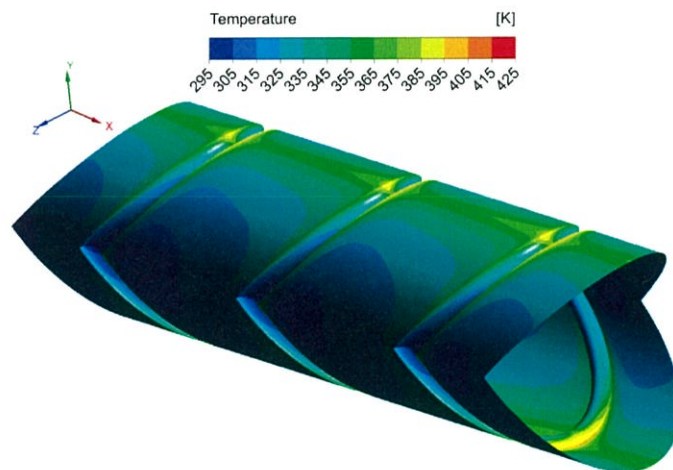


รูปที่ 4.8 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติที่ท่อดวงแหวนตัววีปรับปรุงแบบที่ 1

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 ภายในท่อกลมสามารถทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะการไหลเกิดหมุนวนที่ด้านข้างของวงแหวนรูปตัววีมีมากกว่าแบบมาตรฐาน

การถ่ายเทความร้อนเมื่อกดท่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 (อิทธิพล Blockage Ratio, BR)

การถ่ายเทความร้อนเมื่อกดท่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 จะถูกพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ ดังแสดงไว้ในรูป 4.9



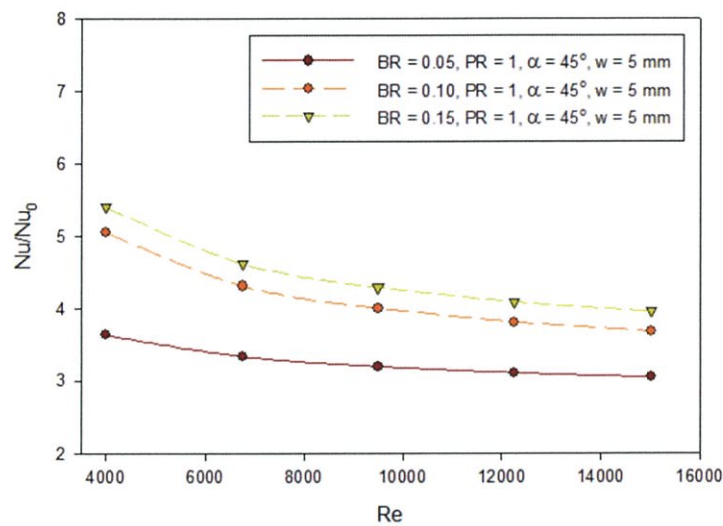
รูปที่ 4.9 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อกดท่อเป็นท่อดวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1

จากรูป 4.9 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววี $BR = 0.05$, $PR = 1.0$, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$ และ $Re = 4000$ เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 ทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้นเป็นผลทำ

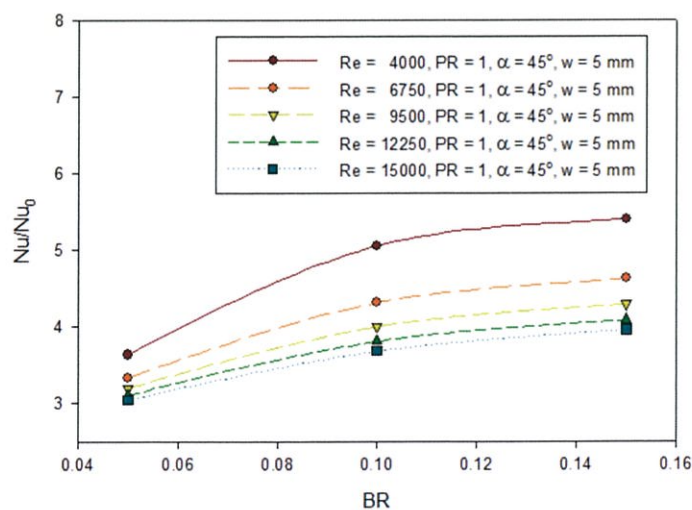
ให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าความร้อนที่บริเวณผนังท่อได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ยังปรากฏคอนทราสต์สัมบริเวณด้านบนของท่อแสดงให้เห็นว่า บริเวณด้านบนของท่อยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลไม่มากพอ จึงมีการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์เมื่อกอดท่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 (อิทธิพล Blockage Ratio, BR)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับ Blockage Ratio (BR) ของท่อกอดวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 ซึ่งพิจารณาที่ อัตราส่วนพิตช์ $PR = 1.0$, อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.05, 0.15$, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000 - 15,000$ แสดงได้ดังรูป 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



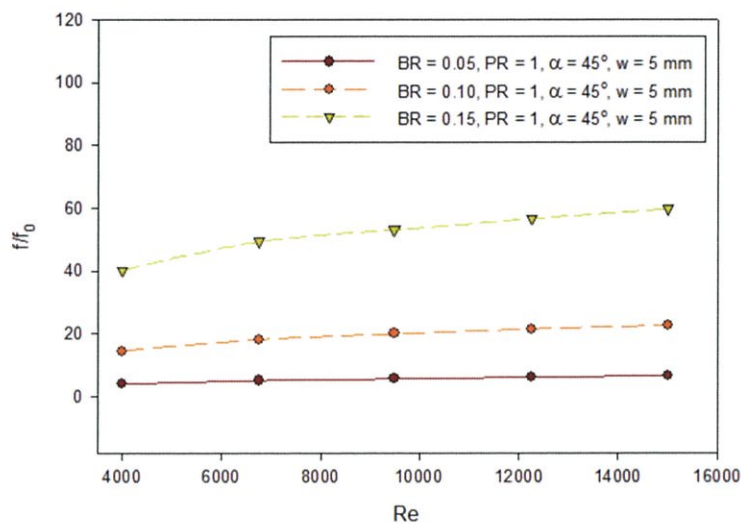
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)



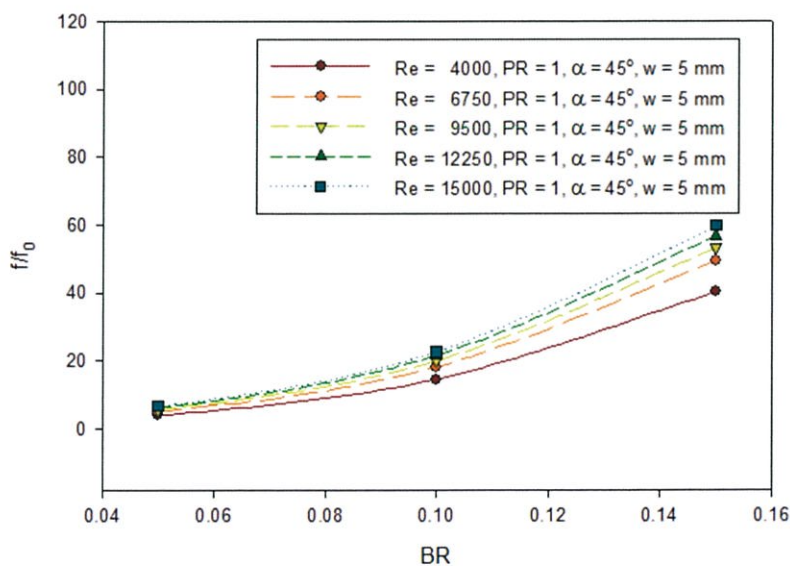
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับ Blockage Ratio (BR)

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าอัตราส่วนเลขนีสเซิลที่อยู่ในช่วง 3.05 - 3.64 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ $Re = 4000 - 15,000$ ซึ่งค่าที่ได้จากการปรับปรุงแบบที่ 1 มากกว่าวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน ตัวประกอบเสียดทานเมื่อกีดท่อวงแหวนตัววีปรับปรุงแบบที่ 1

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับ Blockage Ratio (BR) ของท่อกีดวงแหวนรูปตัววี ซึ่งพิจารณาที่ อัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$, อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.05, 0.15$, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000 - 15,000$ แสดงได้ดังรูป 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)



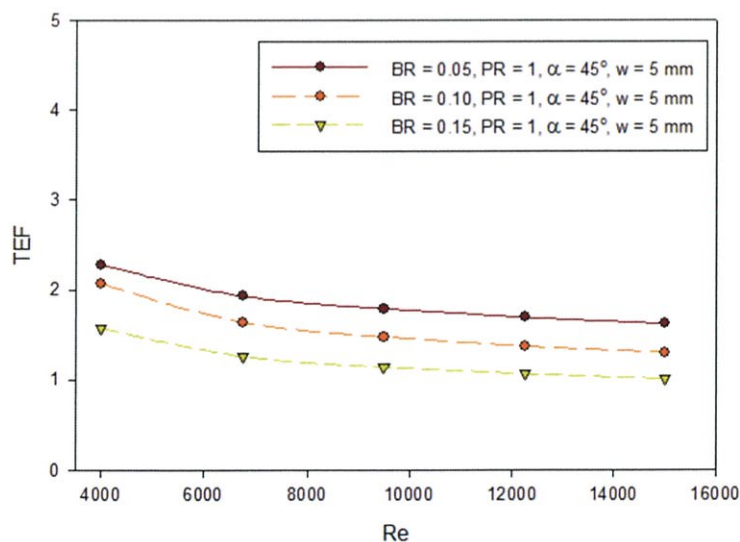
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับ Blockage Ratio (BR)

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) ของท่อคดวงแหวนรูปตัววี BR = 0.05 อยู่ในช่วง 4.08 - 6.65 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อเปรียบเทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐานทำให้เห็นว่า เมื่อลด Blockage Ratio, BR จะทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) ลดลง และเมื่อเพิ่ม Blockage Ratio, BR จะทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) เพิ่มขึ้น

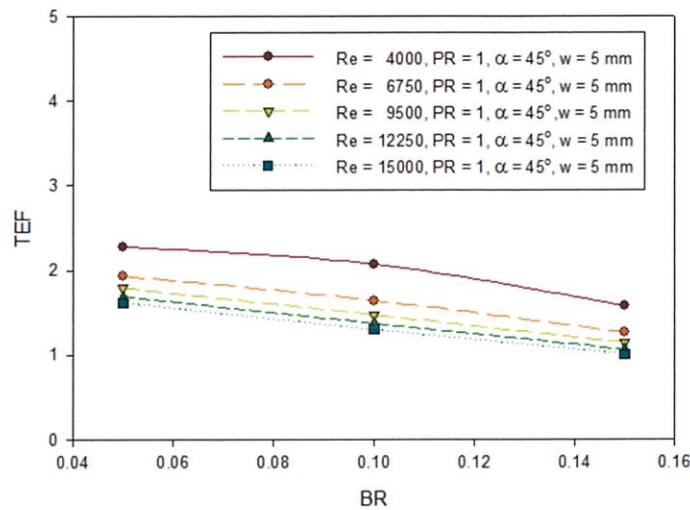
เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) ร่วมกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) พบว่าการกีดท่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) มากขึ้นเมื่อเพิ่ม Blockage Ratio, BR และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) ลดลงเมื่อลด Blockage Ratio, BR และความสัมพันธ์ของ Blockage Ratio, BR กับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) อย่างไรก็ตามเราก็กังต้องพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสำหรับชีวิตถึงประสิทธิภาพที่ได้และเพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานของวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 ว่ามีประสิทธิภาพดีหรือไม่

สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อกีดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่1(อิทธิพล Blockage Ratio, BR)

ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับ Blockage Ratio (BR) ของท่อคดวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 ซึ่งพิจารณาที่ อัตราส่วนพิตช์ PR = 1.0, อัตราส่วนบล็อก BR = 0.05, 0.15, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ Re = 4000 - 15,000 แสดงได้ดังรูป 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับ Blockage Ratio (BR)

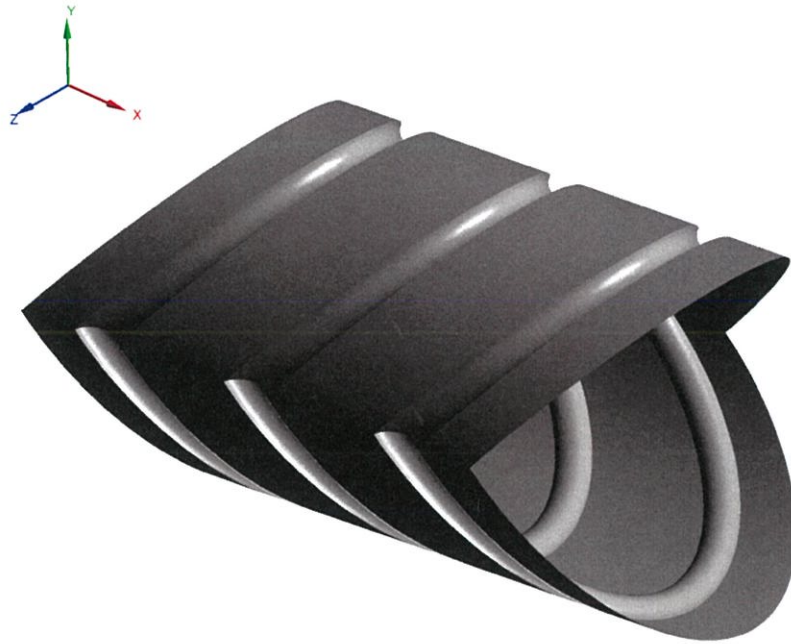
เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าสมรรถนะเชิงความร้อนอยู่ในช่วง 1.62 - 2.28 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ $Re = 4000 - 15,000$ ของวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 $BR = 0.05$

จากการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 1 โดยการเปลี่ยน Blockage Ratio, BR มีผลช่วยให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้นกว่าวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน แต่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนยังไม่สูงพอสำหรับนำไปใช้ จึงได้ทำการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 2 ขึ้น โดยเพิ่มการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีโดยการเปลี่ยน Pitch Ratio, PR เพื่อช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานให้น้อยลงแต่ยังสามารถสร้างความปั่นป่วนให้กับของไหลได้เช่นเดิม ซึ่งคาดหวังว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะเพิ่มสูงมากขึ้น

4.1.3 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2

รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 (อิทธิพลของ Pitch Ratio, PR)

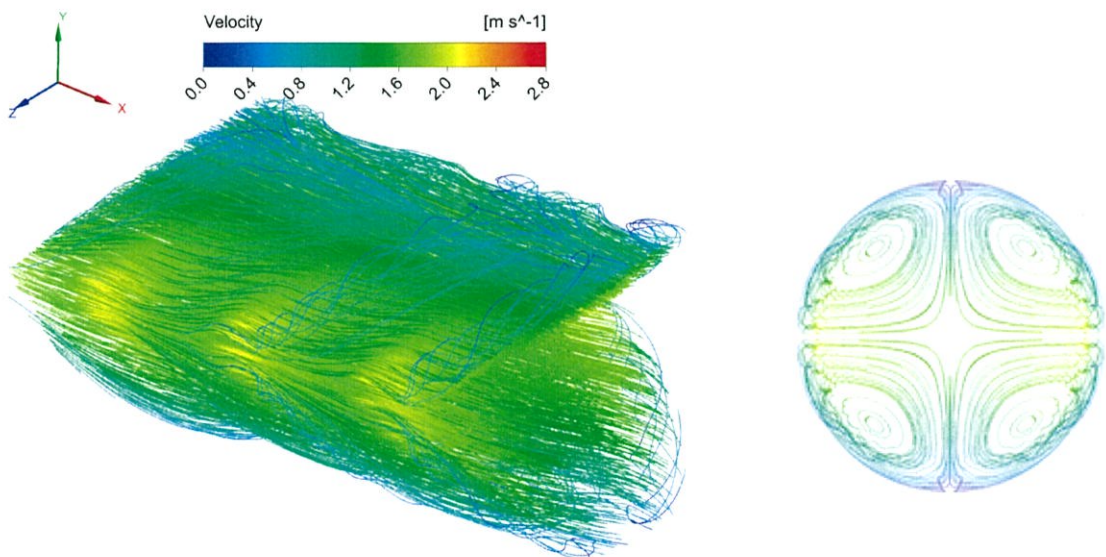
จากการศึกษาการกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 ทำให้ทราบว่าสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ แต่ยังมีปัญหาค่าตัวประกอบเสียดทานที่ยังสูง และการกระจายของอุณหภูมิยังน้อยที่บริเวณด้านบนของวงแหวนรูปตัววีดังนั้นจึงเป็นที่มาของการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 2 คือ การเปลี่ยนอัตราส่วนพิทช์ (Pitch Ratio, $PR = p/d$) ซึ่งคาดหวังว่าจะเปลี่ยนระยะการไหลและช่วยเพิ่มการกระจายของอุณหภูมิที่บริเวณด้านบนของวงแหวนรูปตัววีได้ จึงได้ทำการทดลองเปลี่ยนค่า PR ของวงแหวนรูปตัววีจากวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 ไปเป็นอัตราส่วน 0.5 และ 1.5 จากการศึกษาสรุปได้ว่าค่า PR ที่เหมาะสมที่สุดคือ $PR = 0.5$ โดยให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่วง 1.48 - 2.43 ที่ $Re = 4000 - 15,000$ ซึ่งสูงกว่า $PR = 1.5$ และวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 ดังนั้นในการศึกษาตัวแปรอื่นๆของท่อกดวงแหวนรูปตัววีจะยึดค่า $PR = 0.5$ เป็นหลักต่อไป ตัวอย่างดังรูป 4.16



รูปที่ 4.16 ท่อคดวงแหวนตัววีปรับปรุงแบบที่ 2

เส้นกระแสการไหลเมื่อกุดท่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 (อิทธิพล Pitch Ratio, PR)

เส้นกระแสการไหลเมื่อกุดท่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 จะแสดงในรูปแบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลภายในท่อ ดังแสดงไว้ในรูป 4.17

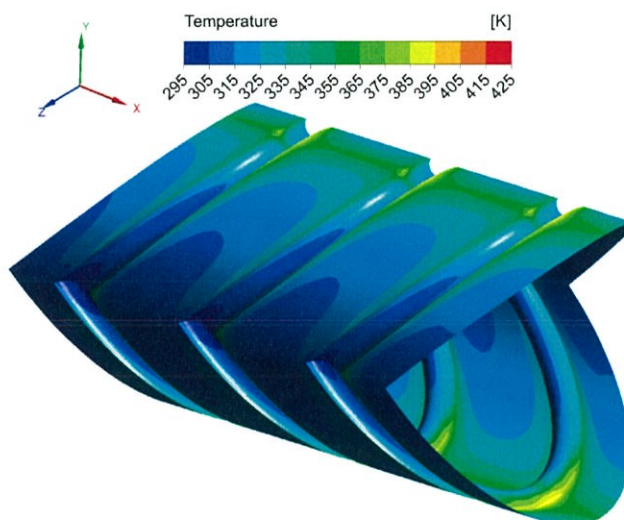


รูปที่ 4.17 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติท่อคดวงแหวนตัววีปรับปรุงแบบที่ 2

จากรูปซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อถอดท่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 สามารถทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น สังเกตได้จากลักษณะการไหลเกิดการหมุนวนที่ด้านข้างมุมของตัววีมากกว่าแบบมาตรฐานและแบบปรับปรุงที่ 1

การถ่ายเทความร้อนเมื่อถอดท่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 (อิทธิพล Pitch Ratio, PR)

การถ่ายเทความร้อนเมื่อถอดท่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 จะถูกพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ ดังแสดงไว้ในรูป 4.18

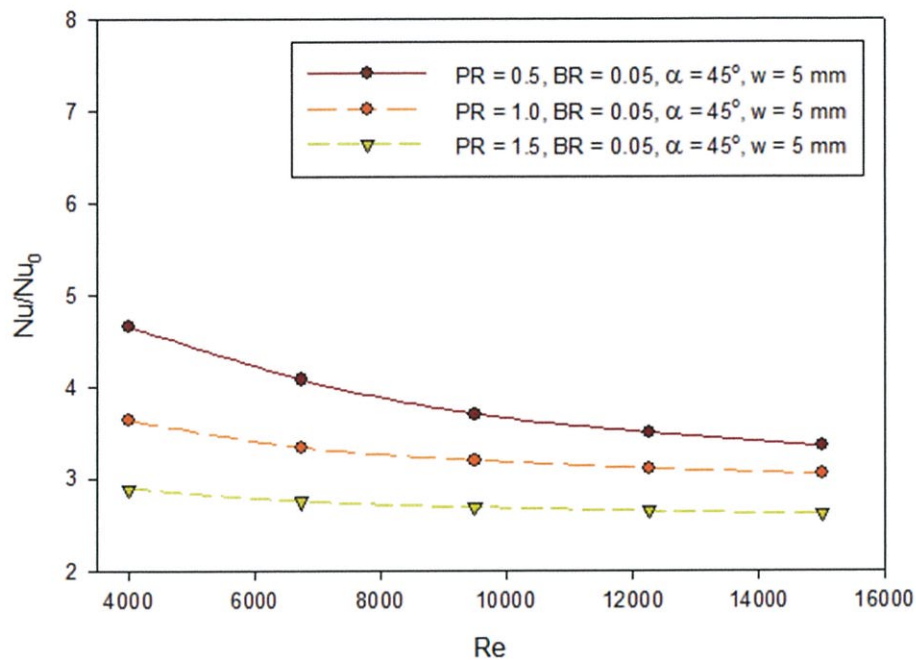


รูปที่ 4.18 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อถอดท่อเป็นท่อวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2

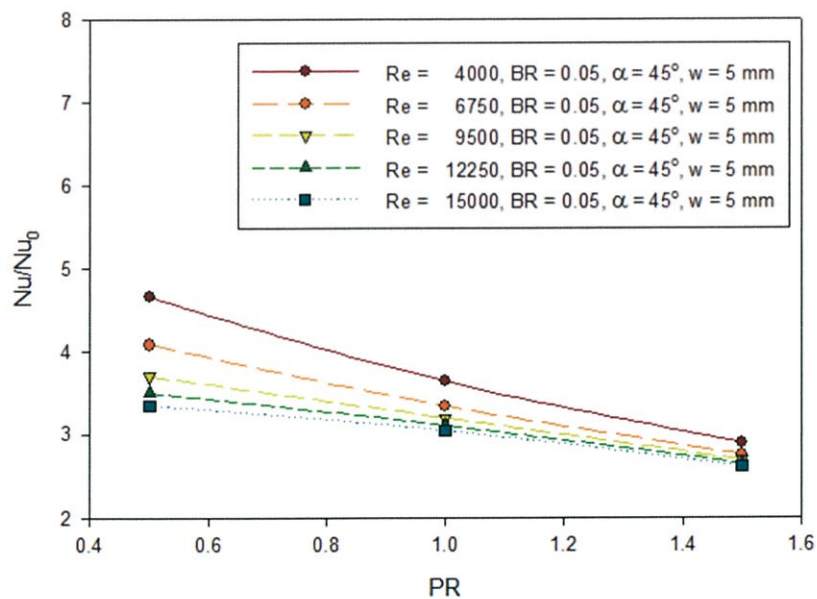
จากรูป 4.18 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการถอดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววี $BR = 0.05$, $PR = 0.5$, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$ และ $Re = 4000$ เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อถอดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 ทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้นเป็นผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกับความร้อนที่บริเวณผนังท่อได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ยังปรากฏคอนทัวร์สีเหลืองบริเวณด้านบนของท่อแสดงให้เห็นว่า บริเวณด้านบนของท่อยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อย จึงมีการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์เมื่อถอดท่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 (อิทธิพล Pitch Ratio, PR)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับ Pitch Ratio (PR) ของท่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 ซึ่งพิจารณาที่ อัตราส่วนพิทช์ $PR = 0.5, 1.5$, อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.05$, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000 - 15,000$ แสดงได้ดังรูป 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)

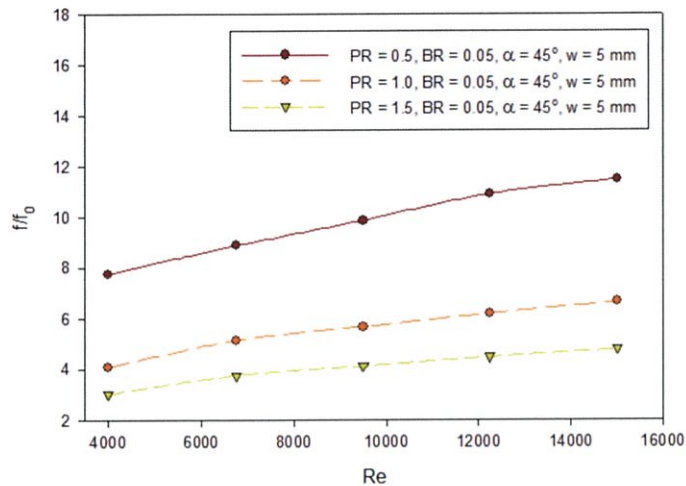


รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) กับ Pitch Ratio (PR)

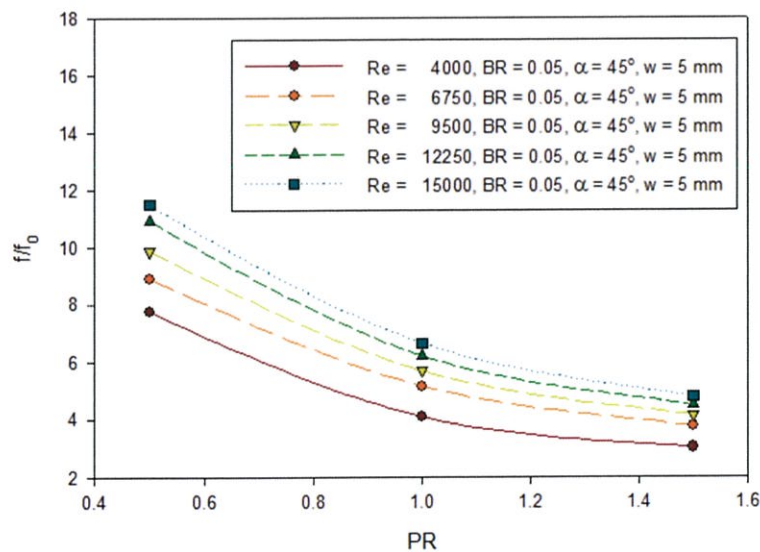
เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ของท่อคดงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 PR = 0.5 อยู่ในช่วง 3.35 - 4.65 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ $Re = 4000 - 15,000$ ซึ่งค่าที่ได้จากการปรับปรุงแบบที่ 2 มากกว่าแบบมาตรฐานและแบบปรับปรุงที่ 1

ตัวประกอบเสียดทานเมื่อกตท่วงแหวนตัววีปรับปรุงแบบที่ 2

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับ Pitch Ratio (PR) ของท่อคดงแหวนรูปตัววี ซึ่งพิจารณาที่ พิจารณาที่ อัตราส่วนพิทช์ $PR = 0.5, 1.5$, อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.05$, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000 - 15,000$ แสดงได้ดังรูป 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)



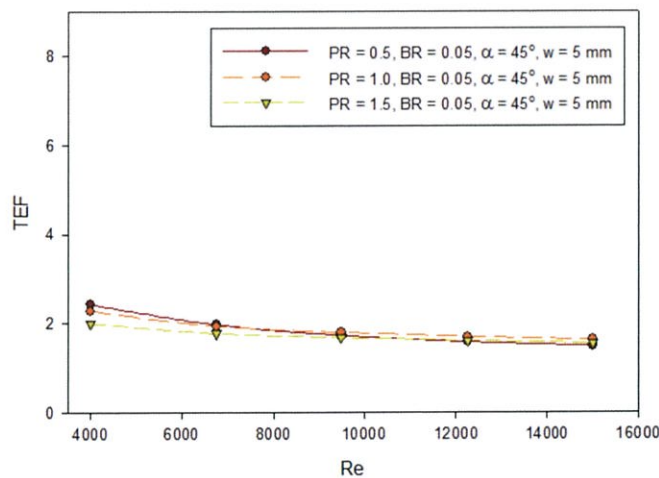
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับ Pitch Ratio (PR)

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) ของท่อคดงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 $PR = 0.5$ อยู่ในช่วง 7.74 - 11.48 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบมาตรฐานทำให้เห็นว่า เมื่อลด Pitch Ratio, PR จะทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่ม Pitch Ratio, PR จะทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) ลดลง

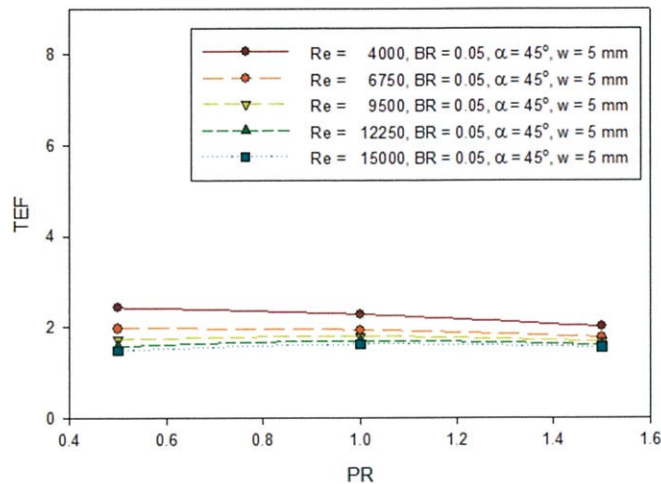
เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ (Nu/Nu_0) ร่วมกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) พบว่าการกดท่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ (Nu/Nu_0) มากขึ้นเมื่อลด PR แต่ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ (Nu/Nu_0) ลดลงเมื่อเพิ่ม PR แต่ในทางกลับกันเมื่อเพิ่ม PR ทำให้ลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) ลงได้ และเมื่อลด PR ทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสำหรับชีวิตถึงประสิทธิภาพที่ได้และเพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานของวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 ว่ามีประสิทธิภาพดีหรือไม่

สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 (อิทธิพล Pitch Ratio, PR)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับ Pitch Ratio (PR) ของท่อคดงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 ซึ่งพิจารณาที่ $BR = 0.1$, $PR = 0.5, 1.5$, มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000 - 15,000$ แสดงได้ดังรูป 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับ Pitch Ratio (PR)

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าสมรรถนะเชิงความร้อนอยู่ในช่วง 1.48 - 2.43 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ $Re = 4000 - 15,000$ ของวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 $PR = 0.5$

จากการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 2 โดยการเปลี่ยน Pitch Ratio, PR มีผลช่วยให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้นกว่าวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐานและแบบปรับปรุงที่ 1 แต่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนยังไม่สูงพอสำหรับนำไปใช้ จึงได้ทำการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 3 ขึ้น โดยเพิ่มการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีโดยการเปลี่ยน มุมปะทะ เพื่อช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานให้น้อยลงแต่ยังสามารถสร้างความปั่นป่วนให้กับของไหลได้เช่นเดิม ซึ่งคาดหวังว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะเพิ่มสูงมากขึ้น

4.1.4 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3

รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 (อิทธิพล มุมปะทะ, α)

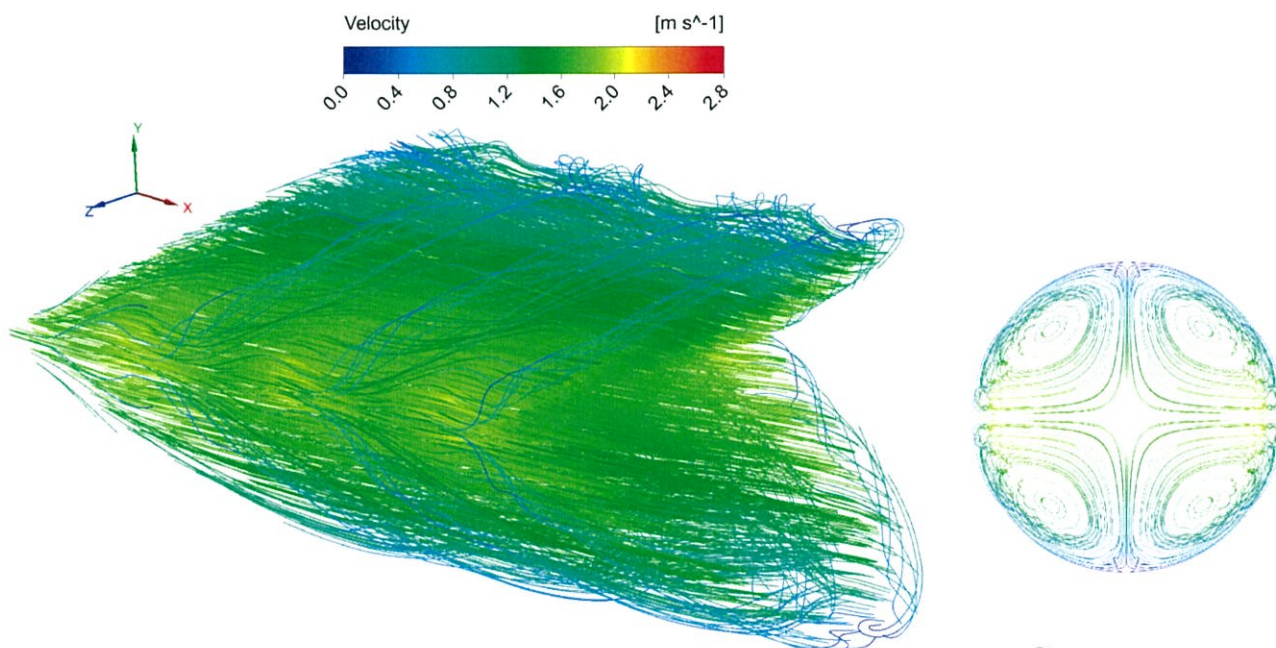
จากการศึกษาการกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 ทำให้ทราบว่าสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ แต่ยังมีปัญหาค่าตัวประกอบเสียดทานที่ยังสูงเนื่องจากบริเวณของผิวที่โดนกดลงไปเกิดเป็นวงแหวนได้กีดขวางการไหลของของไหลอยู่มาก จึงมีแนวคิดจะเปลี่ยนมุมปะทะ เพื่อช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานลง ได้ทำการทดลองเปลี่ยนค่ามุมปะทะ, α ของวงแหวนรูปตัววีที่มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดจากหัวข้อก่อนหน้านี้ไปเป็น $\alpha = 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ทั้งสิ้น 3 มุม โดย $\alpha = 20^\circ$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่วง 1.9 - 3.1 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และ $\alpha = 30^\circ$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่วง 1.73 - 2.53 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และ $\alpha = 60^\circ$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่วง 1.41 - 2.27 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ตัวอย่างวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 ดังรูป 4.25



รูปที่ 4.25 ท่อคดวงแหวนตัววีแบบปรับปรุงที่ 3

เส้นกระแสการไหลเมื่อคดต่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3

เส้นกระแสการไหลเมื่อคดต่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 จะแสดงในรูปแบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลภายในท่อดังแสดงไว้ในรูป 4.26

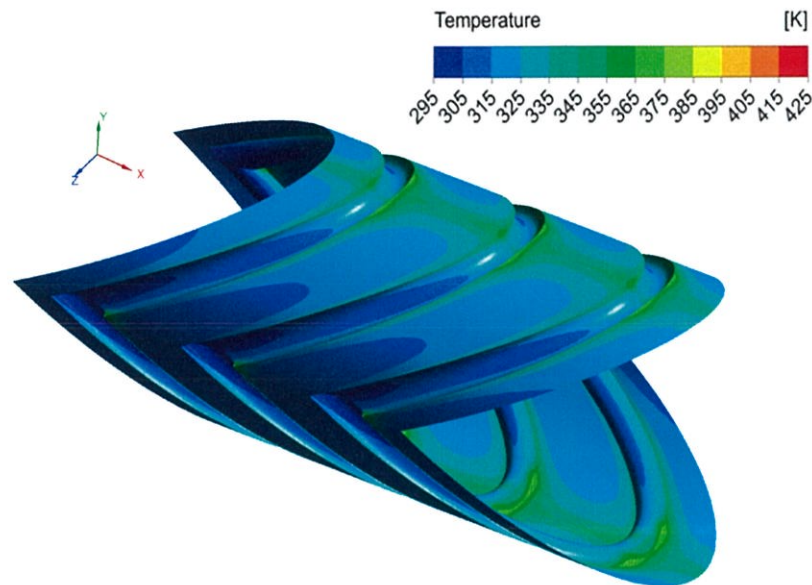


รูปที่ 4.26 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติท่อคดวงแหวนตัววีแบบปรับปรุงที่ 3

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อกดต่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 ภายในท่อกลมสามารถทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะการไหลเกิดหมุนวนที่ด้านข้างของวงแหวนรูปตัววีมีมากกว่าแบบมาตรฐาน, แบบปรับปรุงที่ 1 และแบบปรับปรุงที่ 2

การถ่ายเทความร้อนเมื่อกดต่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3

การถ่ายเทความร้อนเมื่อกดต่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 จะถูกพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ ดังแสดงไว้ในรูป 4.27

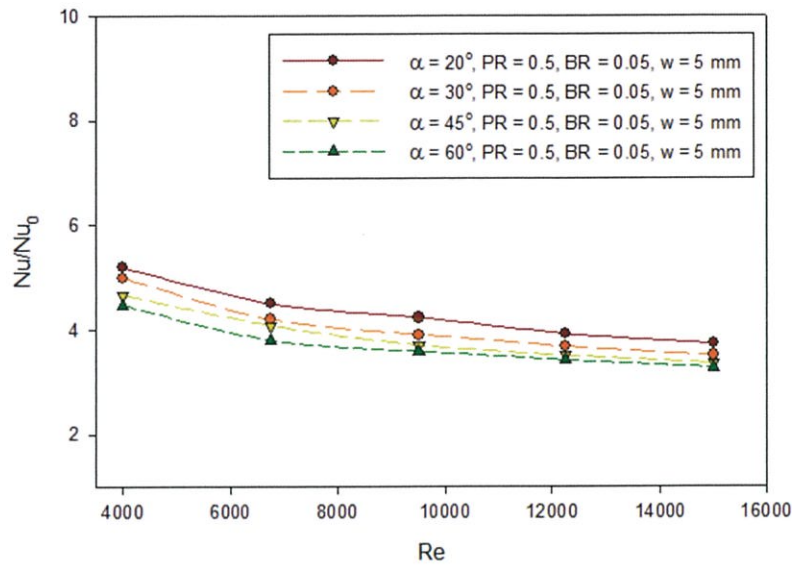


รูปที่ 4.27 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อกดต่อเป็นท่อกดวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3

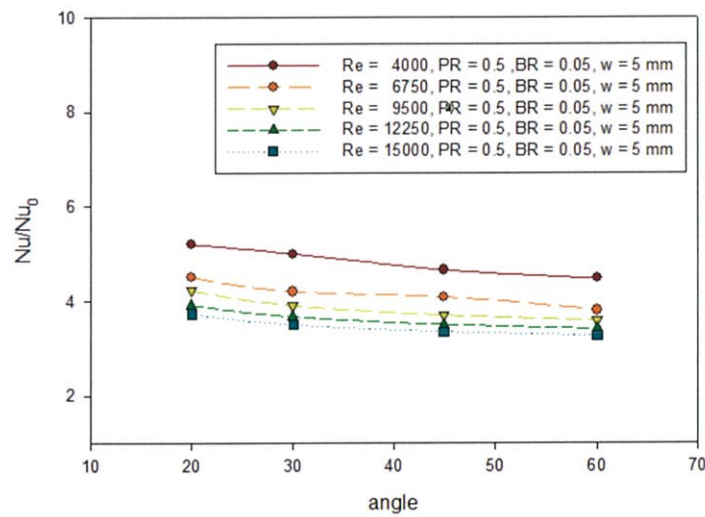
จากรูป 4.27 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการกดต่อเป็นวงแหวนรูปตัววี $BR = 0.05$, $PR = 0.5$, มุมปะทะ $\alpha = 30^\circ$ และ $Re = 4000$ เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อกดต่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 ทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้นเป็นผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าความร้อนที่บริเวณผนังท่อได้ดียิ่งขึ้น

อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์เมื่อกดต่อวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu_0) กับมุมปะทะ (α) ของท่อกดวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 ซึ่งพิจารณาที่ อัตราส่วนพิตช์ $PR = 0.5$, อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.05$, มุมปะทะ $\alpha = 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000 - 15,000$ แสดงได้ดังรูป 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)

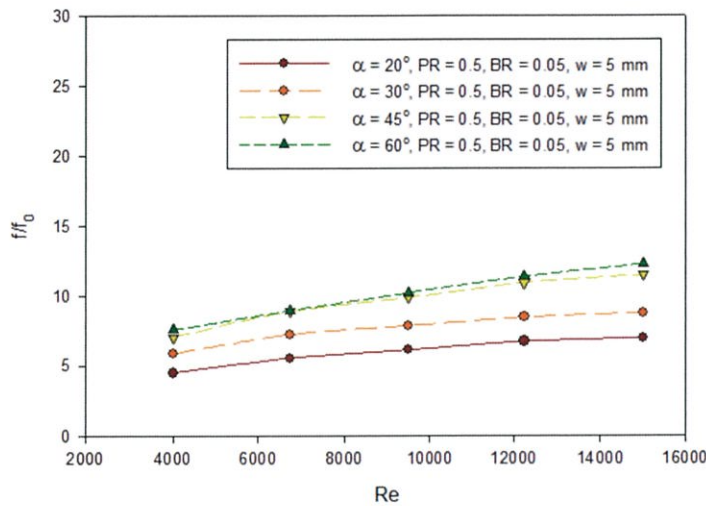


รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) กับมุมปะทะ (α)

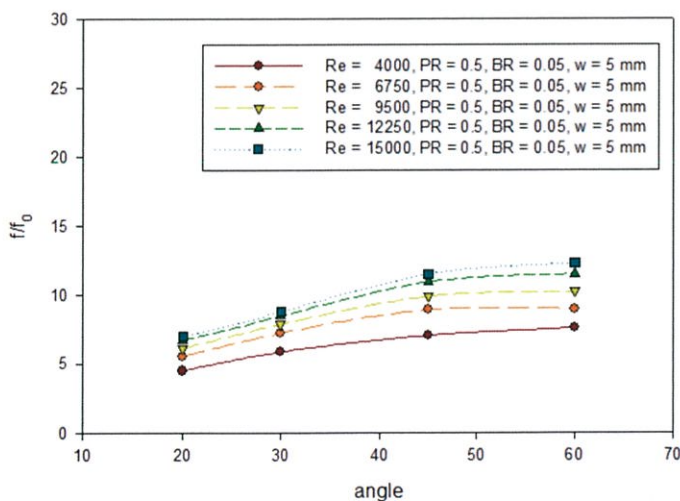
เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) ของท่อคดงแหวนรูปตัววีที่มีอัตราส่วนพิตช์ $PR = 0.5$, อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.05$, มุมปะทะ $\alpha = 20^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนรูปตัววี 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000 - 15,000$ อยู่ในช่วง 3.73 - 5.2 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ของท่อคดงแหวนรูปตัววีที่มี $\alpha = 30^\circ$ มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) อยู่ในช่วง 3.58 - 4.57 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ของท่อคดงแหวนรูปตัววีที่มี $\alpha = 60^\circ$ มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) อยู่ในช่วง 3.27 - 4.47 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

ตัวประกอบเสียดทานเมื่อกดท่อวงแหวนตัววีปรับปรุงแบบที่ 3

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับมุมปะทะ (α) ของท่อกดวงแหวนรูปตัววี ซึ่งพิจารณาที่ อัตราส่วนพิตช์ $PR = 0.5$, อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.05$, $\alpha = 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000 - 15,000$ แสดงได้ดังรูป 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)



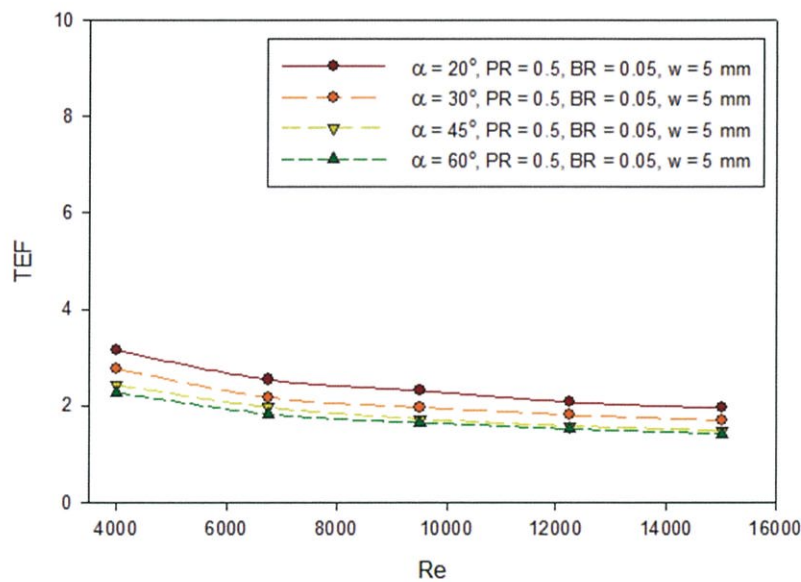
รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับมุมปะทะ (α)

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) ของท่อกดวงแหวนรูปตัววีที่มีอัตราส่วนพิตช์ $PR = 0.5$, อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.05$, มุมปะทะ $\alpha = 20^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ

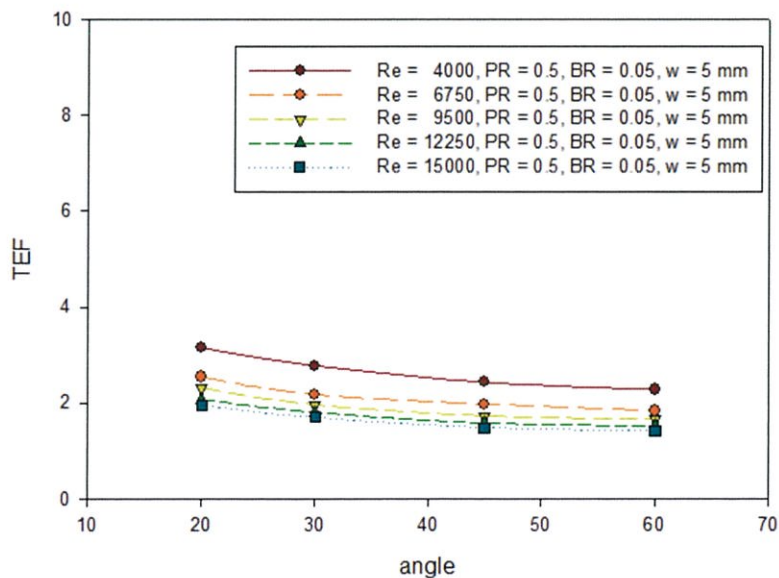
ร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000 - 15,000$ อยู่ในช่วง 4.50 - 7.0 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบของท่อคดงแหวนรูปตัววีที่มี $\alpha = 30^\circ$ มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) อยู่ในช่วง 5.91 - 8.76 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ของท่อคดงแหวนรูปตัววีที่มี $\alpha = 60^\circ$ มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) อยู่ในช่วง 4.89 - 12.34 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อคดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับมุมปะทะ (α) ของท่อคดงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 ซึ่งพิจารณาที่ $BR = 0.05$, $PR = 0.5$, $\alpha = 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ$, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวน 5 มิลลิเมตร และ $Re = 4000 - 15,000$ แสดงได้ดังรูป 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Re)



รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับมุมปะทะ (α)

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าสมรรถนะเชิงความร้อนอยู่ในช่วง 1.9 - 3.1 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ $Re = 4000 - 15,000$ ของวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 $\alpha = 20^\circ$ ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 $\alpha = 30^\circ$ อยู่ในช่วง 1.73 - 2.53 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 $\alpha = 60^\circ$ อยู่ในช่วง 1.41 - 2.27 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ จากการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 3 โดยการเปลี่ยนมุมปะทะ มีผลช่วยให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้นกว่าวงแหวนรูปตัววีแบบมาตรฐาน แบบปรับปรุงที่ 1 และ 2 โดยให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงพอสำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

บทที่ 5

การอภิปรายผลงานวิจัย

จากการทำการศึกษาเมื่อถอดท่อนเป็นวงแหวนรูปตัววีของผู้วิจัย พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา คือ การถอดท่อนวงแหวนเป็นรูปตัววีสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหลและเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่เนื่องจากการถอดท่อนวงแหวนเป็นรูปตัววีแบบมาตรฐาน ทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีผลกับค่าสมรรถนะเชิงความร้อนดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลกับการช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งได้ทำการศึกษาปรับปรุงมุมปะทะ (α) อัตราส่วนบล็อกการไหล (BR) และอัตราส่วนพิตช์ (PR) ที่เหมาะสมในการปรับปรุงการถอดท่อนวงแหวนเป็นรูปตัววี จากการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่าการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีปลายชี้ทวนกระแสการไหลโดยใช้วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 เหมาะสมที่สุดเนื่องจากทำมุมปะทะกับวงแหวนรูปตัววีได้มากทำให้ลดอัตราตัวประกอบเสียดทานลงไปได้มาก โดยลักษณะมุมปะทะของวงแหวนรูปตัววีที่เหมาะสมเท่ากับ 30 องศา อัตราส่วนบล็อกการไหลเท่ากับ 0.05 อัตราส่วนพิตช์เท่ากับ 0.5 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องวงแหวนเท่ากับ 5 มิลลิเมตร โดยให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่เหมาะสมที่สุดในช่วง 1.73 - 2.53 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ 4000 - 15,000

ผลที่ได้จากการศึกษาการถอดท่อนเป็นวงแหวนรูปตัววี โดยการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีในรูปแบบต่างๆนั้น สามารถสรุปผลที่ได้จากรูปทรงวงแหวนรูปตัววีที่ดีที่สุดในแต่ละกรณี ดังแสดงในตาราง 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลที่ดีที่สุดในแต่ละกรณีที่ได้จากการศึกษาการกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววี

รูปแบบการศึกษา	Nu/Nu_0 (Re=4000 - 15,000)	f/f_0 (Re=4000 - 15,000)	TEF (Re=4000 - 15,000)	หมายเหตุ
แบบมาตรฐาน BR=0.1 PR=1.0 $\alpha = 45^\circ$ w=5mm	3.68-5.06	14.59-22.68	1.30-2.07	
ปรับปรุงแบบที่ 1 (เปลี่ยน Blockage Ratio) BR=0.05 PR=1.0 $\alpha = 45^\circ$ w=5mm	3.05-3.64	4.08-6.65	1.62-2.28	
ปรับปรุงแบบที่ 2 (เปลี่ยน Pitch Ratio) PR=0.05 BR=0.5 $\alpha = 45^\circ$ w=5mm	3.35-4.65	7.74-11.48	1.48-2.43	
ปรับปรุงแบบที่ 3 (เปลี่ยนมุมปะทะ) $\alpha = 30^\circ$ BR=0.05 PR=0.5 w=5mm	3.58-4.57	5.91-8.76	1.73-2.53	

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

1. อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกการไหลเมื่อกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววี

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกการไหล พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนบล็อกการไหลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งคู่ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แม้ว่าค่า BR เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ก็ยังส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน และสำหรับกรณีที่ทำการศึกษา พบว่าที่ $BR = 0.15$ จะให้ค่า TEF น้อยที่สุด ดังนั้นในการเลือกใช้ ควรเลือกค่า BR ที่เหมาะสมกับช่วงของการนำไปใช้งาน

2. อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์

พิจารณาอิทธิพลของ PR พบว่า เมื่อค่า PR ลดลง ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 จะมีค่าเพิ่มขึ้นการไหลของของไหลมีระยะการไหลตามยาวที่สั้นลง ทำให้เกิดความปั่นป่วนการไหลหมุนวนมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังให้ค่าความดันตกคร่อมที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน และสำหรับกรณีที่ทำการศึกษา พบว่าที่ $PR = 0.5$ จะให้ค่า TEF มากที่สุด ดังนั้นก่อนจะนำไปประยุกต์กับการใช้งานจริงจึงต้องพิจารณาที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

3. อิทธิพลของมุมปะทะหรือมุมที่ทำกรกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววี

อิทธิพลที่เกิดจากมุมปะทะนั้น พบว่าที่การกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีให้มีขนาดมุมปะทะเล็กๆ ช่วยให้ค่าความดันตกคร่อมและค่าการถ่ายเทความร้อนลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วค่าการถ่ายเทความร้อนที่เสียไปน้อยกว่าค่าความดันตกคร่อมที่ลดลง การทำมุมปะทะให้มีขนาดเล็กจึงมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากกว่าเดิม และสำหรับกรณีที่ทำการศึกษา พบว่าที่ $\alpha = 20^\circ$ จะให้ค่า TEF มากที่สุดแต่มากกว่า $\alpha = 30^\circ$ ไม่มากนัก แต่เมื่อพิจารณาด้านรูปร่างของท่อที่มุมปะทะ 20° จะมีขนาดยาวกว่า มุมปะทะ 30° อยู่มากซึ่งจะส่งผลให้ไม่คุ้มค่าในการผลิตมาใช้จริง ดังนั้นโดยรวมแล้วการกดท่อเป็นวงแหวนรูปตัววีที่มุมปะทะ 30° จะเหมาะสมกว่ามุมปะทะ 20°

6.2 ข้อเสนอแนะและการพัฒนางานวิจัย

จากผลงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้ทราบว่า การใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับทดสอบหาพฤติกรรมการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม มีข้อดีเนื่องจากสามารถช่วยประหยัดเวลาที่ใช้ในการจำลองการไหล และลดต้นทุนสำหรับอุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลองได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นเพียงการทำนายถึงผลการจำลองที่มีความเป็นไปได้ สำหรับการนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ศึกษาไป และในการพัฒนางานวิจัยครั้งต่อไป ควรจะลดขนาดร่องกวางแหวนรูปตัววีเนื่องจาก เมื่อลดขนาดของร่องกวางแหวนแล้ว จะส่งผลให้ร่องกวางแหวนมีพื้นที่ขวางการไหลมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อลักษณะการไหลของของไหล และการถ่ายเทความร้อนของของไหลในท่อ

บรรณานุกรม

- [1] Xiao - weiLi, Ji-an Meng, Zeng-yuanGuo (2009). Turbulent flow and heat transfer in discrete double inclined ribs tube, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.52, pp. 962– 970.
- [2] Witoon Chingtuaythong, Pongjet Promvonge, Chinaruk Thianpong, Monsak Pimsarn (2017). Heat transfer characterization in a tubular heat exchanger with V-shaped rings, Applied Thermal Engineering, vol. 110, pp. 1164 – 241.
- [3] Wen-Chieh Huang, Cheng-An Chen, Chi Shen, Jung-YangSan (2015). Effects of characteristic parameters on heat transfer enhancement of repeated ring type ribs in circular tubes, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 68, pp. 371 – 380.