

การถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใส่วงแหวน
รูปตัววี

Numerical Heat transfer in a tubular heat exchanger with V-shaped ring
inserts



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

การถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใส่วงแหวน
รูปตัววี

Numerical Heat transfer in a tubular heat exchanger with V-shaped ring
inserts



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Numerical Heat transfer in a tubular heat exchanger with V-shaped ring
inserts



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใส่วงแหวนรูปตัววี
Numerical Heat transfer in a tubular heat exchanger with V-shaped ring inserts

ผู้จัดทำ

1. นายชัยเดช อัมรงค์ปรีชาชัย รหัสประจำตัว 56010455
2. นายไตรภูมิ ฐระสิทธิ์ รหัสประจำตัว 56010469
3. นายธนากร วรณพงษ์ รหัสประจำตัว 56010569



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใส่วงแหวนรูปตัววี

นายชัยเดช อัมรงค์ปรัชายัย	56010455
นายไตรภูมิ ชูระสิทธิ์	56010469
นายธนากร วรรณพงษ์	56010569
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2559	

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมที่มีปลั๊กความร้อนที่ผิวคงที่โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS (FLUENT) วงแหวนตัววี 4 แบบคือ รูปตัวโอ รูปไข่ รูปแปดเหลี่ยม-รูปวงรีด้านใน และรูปแปดเหลี่ยม ได้ถูกนำเสนอด้วยค่าอัตราส่วนระยะพิทช์ (Pitch ratio, PR) = 0.5, 1.0 และ 1.5 และค่าอัตราส่วนการขวางกั้นการไหลของแหวน (Blockage ratio, BR) = 0.1, 0.15 และ 0.2 พฤติกรรมการไหลของอากาศและการถ่ายเทความร้อนถูกนำเสนอในช่วง เลขเรโนลด์ (Re) จาก 4,000 ถึง 20,000 ผลจากการศึกษาทดลองของการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมได้แสดงในรูปของ เลขนัสเซิลท์ และตัวประกอบความเสียหายตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมเปล่า พบว่าการใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 4 (O-rings) นี้ให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มทางความร้อนมากกว่าวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบต่างๆ ซึ่งค่าสมรรถนะการเพิ่มทางความร้อนของท่อได้สูงขึ้นตั้งแต่ 1.49 ถึง 2.55 เท่า

Numerical Heat transfer in a tubular heat exchanger with V-shaped ring inserts

Chaidet	Thammarongpreechachai	56010455
Traibhum	Thurasit	56010469
Thanakorn	Wannapong	56010569
Assoc.Prof.Dr. Pongjet	Promvonge	Advisor
Academic Year 2559		

ABSTRACT

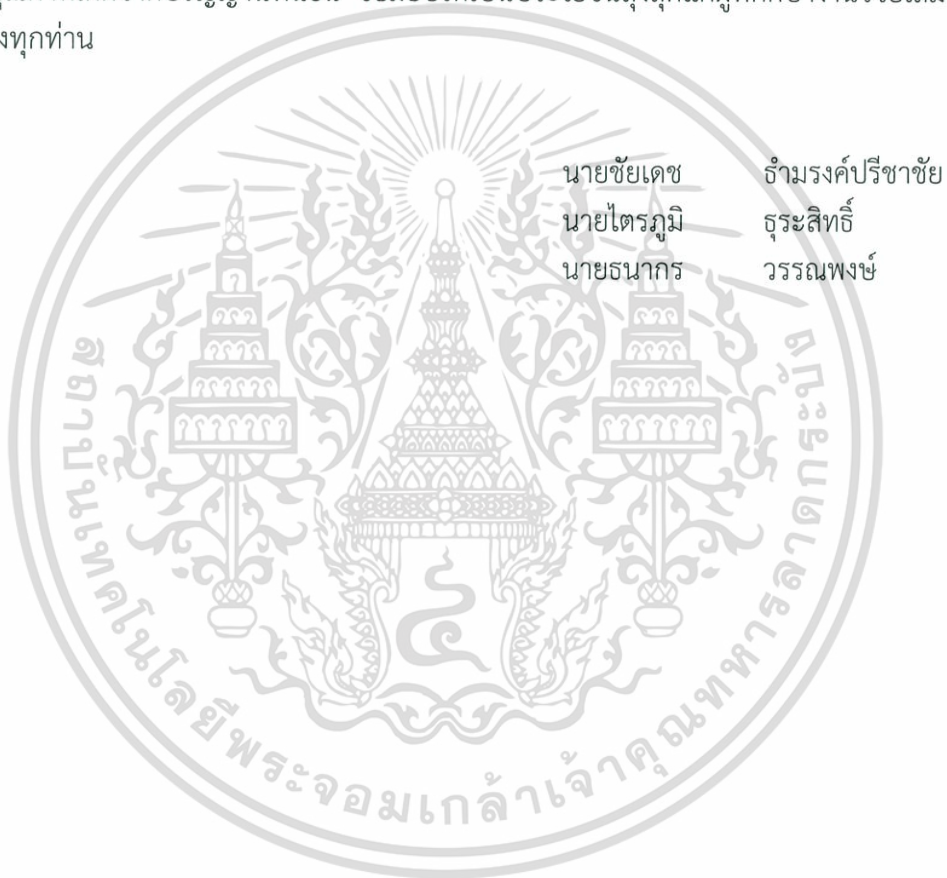
This project presents a numerical simulation of turbulent flow through an uniform heat-fluxed heat exchanger tube with V-shaped ring inserts by a commercial software, ANSYS (FLUENT). Four V-shaped rings: O-ring, oval-ring, octagonal-elliptical ring and octagonal ring, are introduced with three different pitch ratios ($PR = 0.5, 1.0, 1.5$) and three different blockage ratios ($BR = 0.1, 0.15, 0.2$). The airflow and heat transfer behaviors are presented in a range of Reynolds numbers (Re) from 4000 to 20,000. The numerical results on the heat transfer rate and pressure drop of the inserted tube presented in the form of Nusselt number and friction factor, respectively. Those numerical results are compared with available measurements of circular V-rings. Among the numerical results studied, it is found that the O-ring gives the Thermal performance higher than the oval-ring, octagonal-elliptical ring and octagonal ring. The Thermal performance of the circular tube with O-rings is in the range of 1.49 to 2.55 above the smooth tube.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใส่วงแหวนรูปตัววีสำเร็จลงด้วยดี โดยการให้คำปรึกษา การดูแล และความกรุณาจาก รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงค์ ซึ่งทางกลุ่มผู้ทำงานวิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบปริญญาโท อ.สยาม สงวนรัมย์ และผศ.ดร.ณัฐวิภา เกียรติระโนวชิระ ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับงานวิจัยและการทำงานในอนาคต

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเฟื้อในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์

คุณค่าที่เกิดจากปริญญาโทครั้งนี้ ขอมอบให้เป็นประโยชน์สูงสุดแก่ผู้ที่ศึกษางานวิจัยเล่มนี้ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2.1 Kongkaitpaiboon et al. การใส่วงแหวนในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	4
2.2.2 Jedsadaratanachai et al. การถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ติดตั้ง V-baffle.....	5
2.2.3 Chingtuaythong et al. การถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ใส่แหวนรูปตัววี.....	5
2.2.4 Skullong et al. การถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ใส่แผ่นครีบตัดรูปสามเหลี่ยมสองด้าน.....	6
3.1 บทนำ.....	7
3.2 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	7
3.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	7
3.3.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล.....	7
3.3.2 ขั้นตอนการประมวลผล.....	8
3.3.3 ขั้นตอนการแสดงผล.....	8
3.4 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	9
3.4.1 ความเข้ากันได้.....	9
3.4.2 เสถียรภาพของการคำนวณ.....	9
3.4.3 การลู่เข้าของผลเฉลย.....	9
3.4.4 การอนุรักษ์.....	10
3.4.5 ความจำกััดขอบ.....	10
3.4.6 ความเสมือนจริง.....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.7 ความแน่นอน.....	10
3.5 รูปแบบการจัดวางกริด.....	11
บทที่ 4 ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง.....	13
4.1 บทนำ.....	13
4.2 สมมุติฐาน.....	13
4.3 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น.....	13
4.3.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์ของไหล.....	13
4.3.2 การไหลแบบราบเรียบหรือการไหลเป็นชั้นๆ.....	14
4.3.3 การไหลในท่อกลม.....	15
4.3.4 ตัวประกอบความเสียดทาน.....	16
4.4 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน.....	17
4.4.1 วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน.....	17
4.4.2 สภาวะการถ่ายเทความร้อน.....	18
4.4.3 สภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน.....	19
4.4.4 การพาความร้อน.....	19
4.4.4.1 หลักการพื้นฐานของการพาความร้อน.....	19
4.4.4.2 ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน.....	19
4.4.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	20
4.4.4.4 ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน.....	21
4.5 การคำนวณการไหลแบบชั่วเป็นช่วง.....	21
4.5.1 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความเร็ว.....	21
4.5.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลชั่วเป็นช่วง.....	22
4.5.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลชั่วเป็นช่วง.....	22
4.5.2 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความร้อน.....	23
4.6 สมการพื้นฐานและแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน.....	24
4.6.1 สมการควบคุม.....	24
4.6.2 แบบจำลองความปั่นป่วน.....	25
4.6.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$	25
4.6.2.2 วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK.....	26
4.6.2.3 การคู่ควบของความดันและความเร็ว.....	27
บทที่ 5 การออกแบบแบบจำลองและขั้นตอนการศึกษา.....	29
5.1 รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีที่ใช้ในการศึกษา.....	29
5.1.1 วงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม.....	29
5.1.2 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 (Octagonal rings).....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.3 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 (Octagonal-Elliptical rings).....	31
5.1.4 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 (Oval rings).....	32
5.1.5 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 4 (O-rings).....	33
5.2 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์ปัญหา.....	34
5.3 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ.....	35
5.4 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	35
5.4.1 การตรวจสอบแบบจำลองปั่นป่วน.....	35
5.5 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม.....	36
5.6 วิธีการดำเนินการศึกษา.....	38
บทที่ 6 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล.....	39
6.1 วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม).....	39
6.1.1 รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม).....	39
6.1.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่วงแหวนแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม).....	43
6.1.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม).....	44
6.1.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม).....	45
6.1.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม).....	46
6.1.6 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม).....	47
6.2 วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี).....	48
6.2.1 รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี).....	48
6.2.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี).....	51
6.2.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี).....	52
6.2.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี).....	52
6.2.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี).....	54
6.2.6 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววี แบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี).....	55
6.3 วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่).....	56
6.3.1 รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่).....	56
6.3.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่).....	59
6.3.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่).....	60
6.3.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่).....	61
6.3.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่).....	62
6.3.6 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่).....	63
6.4 วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring).....	64
6.4.1 รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring).....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.4.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใสวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุ้งที่ 4 (O-ring).....	67
6.4.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใสวงแหวนแบบปรับปรุ้งที่ 4 (O-ring).....	68
6.4.4 อัตราส่วนเลขน้สเซลท์เมื่อใสวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุ้งที่ 4 (O-ring).....	68
6.4.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใสวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุ้งที่ 4 (O-ring).....	69
6.4.6 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใสวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุ้งที่ 4 (O-ring).....	70
6.5 อิทธิพลจากอัตราส่วนความสูงของวงแหวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ.....	72
6.6 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์.....	75
6.7 การอภิปรายผลงานวิจัย.....	78
บรรณานุกรม.....	80



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 จำนวนของกริดที่ใช้ในการทดสอบ.....	37
6.1 สรุปผลที่ดีที่สุดในแต่ละกรณีที่ได้ศึกษาวงแหวนรูปตัววีเมื่อใส่ภายในกลม.....	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 circular-ring turbulators.....	4
2.2 V-baffles.....	5
2.3 V-shaped rings.....	5
2.4 delta-wing tape.....	6
3.1 ความเชื่อมโยงของกระบวนการดีสครีทไทต์และผลแลยประมาณค่า.....	8
3.2 แสดงถึงความแตกต่างระหว่างความแน่นอนและความแม่นยำ.....	11
3.3 รูปแบบการวางกริด.....	12
3.4 บริเวณแรงเงาแสดงถึงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ.....	12
4.1 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลผ่านผิวของวัตถุ.....	14
4.2 การไหลอย่างสมบูรณ์ภายในท่อกลม.....	16
4.3 ตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลแบบสมบูรณ์ในท่อกลม.....	17
4.4 รูปทรงเรขาคณิตที่เข้าเป็นช่วง.....	22
4.5 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ.....	26
5.1 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม.....	29
5.2 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติ ของท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 (Octagonal rings).....	30
5.3 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 (Octagonal-Elliptical rings).....	31
5.4 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 (Oval rings).....	32
5.5 ท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 4 (O-rings).....	33
5.6 เลขนัสเซลล์จากแบบจำลองปั่นป่วน k-ε และผลการทดลองของ Chingtuaythong [3].....	35
5.7 ตัวประกอบเสียดทานจากแบบจำลองปั่นป่วน k-ε และผลการทดลองของ Chingtuaythong [3].....	36
5.8 รูปแบบกริดและขอบเขตการไหลของท่อกลมที่มีการใส่วงแหวนรูปตัววี.....	37
6.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิมที่ BR=0.1, PR=0.5 (ก) ค่าเลขนัสเซลล์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์.....	40
6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1เทียบกับ วงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม ที่ BR=0.1, PR=0.5 (ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	41
6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ ที่ BR=0.1, PR=0.5 ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 เทียบกับแบบดั้งเดิม.....	42
6.4 ท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1.....	42
6.5 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1.....	43
6.6 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1.....	43
6.7 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งมีขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ IX อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1	
(ก) ค่าเลขนัสเซลท์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์.....	45
6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1	
(ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	46
6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์	
ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1.....	47
6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2	
เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ที่ BR=0.1, PR=0.5	
(ก) ค่าเลขนัสเซลท์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์.....	48
6.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2	
เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ที่ BR=0.1, PR=0.5	
(ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	49
6.13 สมรรถนะเชิงความร้อนของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 เทียบกับแบบปรับปรุงที่ 1.....	50
6.14 รูปทรงของท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2.....	50
6.15 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2.....	51
6.16 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2.....	51
6.17 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2.....	52
6.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2	
(ก) ค่าเลขนัสเซลท์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์.....	53
6.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2	
(ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	54
6.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์	
ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2.....	55
6.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 เทียบกับ	
วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (ก) ค่าเลขนัสเซลท์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์.....	56
6.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 เทียบกับ	
วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน(ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	57
6.23 สมรรถนะเชิงความร้อนของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 เทียบกับแบบปรับปรุงที่ 2.....	58
6.24 ท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่).....	58
6.25 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่).....	59
6.26 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่).....	60
6.27 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่).....	60
6.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววี	
แบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่) (ก) ค่าเลขนัสเซลท์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ X อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	62
6.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3.....	63
6.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (ก) ค่าเลขนัสเซลล์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์.....	64
6.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 เทียบกับ (ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	65
6.33 สมรรถนะเชิงความร้อนของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เทียบกับแบบปรับปรุงที่ 3.....	66
6.34 ท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring).....	66
6.35 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring).....	67
6.36 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring).....	67
6.37 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring).....	68
6.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (ก) ค่าเลขนัสเซลล์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์.....	69
6.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	70
6.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4.....	71
6.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1, 2, 3 และ 4.....	71
6.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์เลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ BR ต่างๆ เทียบกับค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์.....	72
6.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ BR เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 เทียบกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	73
6.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ BR = 0.1, 0.15 และ 0.2.....	74
6.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ PR = 0.5, 1.0 และ 1.5 เทียบกับค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์.....	75
6.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ PR = 0.5, 1.0 และ 1.5 เทียบกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	76
6.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ของ PR = 0.5, 1.0 และ 1.5 ที่ BR = 0.1.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XI อย่างอึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	นัสเซิลต์นัมเบอร์
Nu_0	นัสเซิลต์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบ
P	เส้นรอบรูป, m
Pr	พลาตันนัมเบอร์
PR	ระยะพิตต์
Δp	ความดันลดของของไหล , N/m^2
Q	อัตราการไหลของของไหล , m^3/s
q_{conv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด , W
q''_s	ฟลักซ์ความร้อนที่ผิว , W/m^2
R	ค่าคงที่ของก๊าซ , $J/kg \cdot K$
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์
r_0	รัศมีมีท่อกลม , m
T	อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ , $^{\circ}C$
T_b	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, $^{\circ}C$
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ , $^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$T_{m,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อทางเข้า , °C
$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อทางออก , °C
T_s	อุณหภูมิเฉลี่ยผิวครีป , °C
u	ความเร็วตามแนวแกน x , m/s
u_m	ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ , m/s
\bar{V}	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล , m/s
v	ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน y , m/s
w	ความเร็วเฉลี่ยในแกน z , 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
$X_{fd,h}$	ความยาวช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวของการไหล , m
$X_{fd,t}$	ความยาวช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวของความร้อน , m



บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันในงานทางด้านอุตสาหกรรม การวิจัยเกี่ยวกับเครื่องมือและอุปกรณ์ใหม่ๆที่สามารถสร้างผลกำไร จะช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายของกระบวนการผลิต รวมถึงการประหยัดพลังงาน ซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์อย่างคุ้มค่าและนั่นถือเป็นเรื่องที่น่าสนใจยิ่ง ดังนั้นบาง อุตสาหกรรมได้มีการพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนที่เรียกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ภายใต้ข้อจำกัด ในแง่ของการ เพิ่มประสิทธิภาพที่สูงขึ้น การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของอุปกรณ์ การ เพิ่มการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์โดยการเพิ่มพื้นที่ ผิวสัมผัสด้วยครีบหรือแผ่นบางภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะช่วยให้เกิดการไหลที่มีความรุนแรงและปั่นป่วนที่มากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น โดยการไหลที่ถูกทำให้เปลี่ยนแปลงไปนี้ ก็ได้นำมาซึ่งค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และค่าของ ความดันตกคร่อมที่เปลี่ยนแปลงไปตามไปด้วย ผลของการใช้วงแหวนตัววีที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหล เรียกว่าการไหลของกระแสไหลวน (vortex flow) ลักษณะการไหลแบบนี้จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การประหยัดพลังงานถือเป็นสิ่งสำคัญในยุคปัจจุบัน เนื่องจากทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อช่วยลดการเกิดภาวะโลกร้อน และสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อให้มีการใช้พลังงานให้มี ประสิทธิภาพให้ดีที่สุด ในที่นี้เราจะพิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ด้วยสาเหตุที่ต้องการจะประหยัดพลังงานและต้นทุน จึงได้มีการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อที่จะลดขนาดของเครื่องให้เล็กลงและมีประสิทธิภาพดีขึ้น และสามารถนำหลักการมาใช้กับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องได้ เช่น เครื่องอบอาหาร เครื่องทำความเย็น ระบบระบายความร้อน โรงไฟฟ้า และอื่นๆ

การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถทำได้ด้วยสองวิธีคือ Active Techniques และ Passive Techniques โดยวิธี Active Techniques เป็นวิธีที่ใช้พลังงานภายนอกมากระทำ เช่น การทำให้ของไหลมีการสั่น, การป้อนสนามไฟฟ้า, การเพิ่มการปั่นป่วนของของไหล โดยการเพิ่มความดันจากปั๊ม ส่วนวิธี Passive Techniques จะเป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้พลังงานภายนอกมากระทำ เช่น การเพิ่มพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการสอดใส่ครีบในรูปร่างต่างๆ รวมถึงการดัดแปลงผิวท่อให้เป็นลักษณะต่างๆ โดยงานวิจัยนี้ เราจะพิจารณาที่ Passive Techniques ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก ซึ่งสามารถทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มาก แต่วิธีนี้ก็จะทำให้เกิดความเสียหายภายในท่อเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันตกคร่อมภายในท่อด้วยเช่นกัน ดังนั้น เราจะทำการจำลองทางคณิตศาสตร์การใส่ครีบพิบ แบบต่างๆ เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบ และทำการ optimize เพื่อหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการจำลองทางตัวเลขของการไหล แบบปั่นป่วนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ heat fluxed คงที่ในท่อกลมที่มีการสอดใส่วงแหวนตัววีพับ โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS (FLUENT)

2.1.2 เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของพฤติกรรม การไหลของอากาศและความร้อนเช่น การถ่ายโอนความร้อน ความดันลดลง และ TEF (Thermal enhance factor) ของการไหลของอากาศภายใน ท่อที่มีการสอดใส่วงแหวนตัววี

2.1.3 เพื่อพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพ ของการใช้วงแหวนตัววีในรูปทรงที่แตกต่างกัน และการจัดวางในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ใช้วิธีการคำนวณแบบปริมาตรสี่เหลี่ยมกับ ระเบียบวิธี SIMPLE

1.3.2 ทำการศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 4,000 - 20,000

1.3.3 การให้ความร้อนที่ผิวเป็นแบบฟลักซ์ความร้อน คงที่ 600 W/m^2

1.3.4 อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (Pitch ratio, PR) เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5

1.3.5 อัตราส่วนการบล็อกรไหล (Blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม

1.4.2 กำหนดรูปแบบของปัญหา และลักษณะรูปแบบของแผ่นกั้นที่เราสนใจ จากนั้นสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Ansys

1.4.3 ทำ grid independent เพื่อหาจำนวนกริดที่เหมาะสมในการทำการวิเคราะห์และ validation ผลของการคำนวณแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนและช่องว่างระหว่างแผ่นครีบและผิวด้านในของท่อ เทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

1.4.4 ทำการคำนวณเชิงตัวเลข จากแบบจำลองการไหลที่ต้องการศึกษา โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ระบุไว้ในขอบเขตของงานวิจัย ได้แก่ เลขเรย์โนลด์ อัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และอัตราส่วนการบล็อกรไหล เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในแต่ละโมเดลแผ่นกั้น

1.4.5 นำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขมาวิเคราะห์และแสดงผลในรูปแบบพารามิเตอร์ไว้หน่วย

1.4.6 ทำการสรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ และให้ข้อเสนอแนะในสิ่งที่ควรทำการวิจัยต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.5.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- 1.5.2 เพื่อสามารถออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนของการผลิตได้
- 1.5.3 เพื่อการนำหลักการของการออกแบบนี้ไปประยุกต์กับอุปกรณ์อื่นๆ ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

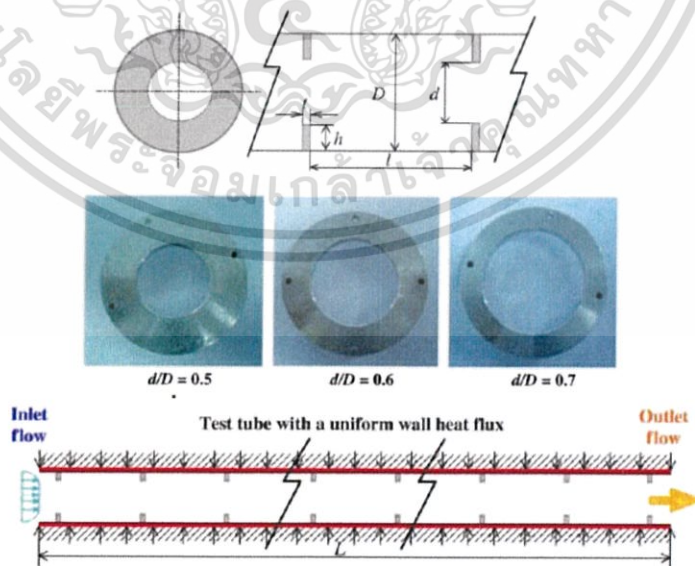
2.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการติดตั้งแผ่นกั้นเพื่อสร้างความปั่นป่วนในท่อกลม การติดตั้งแผ่นกั้นในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยจำนวนมากที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับการติดตั้งแผ่นกั้นในลักษณะต่างๆ เพื่อที่จะช่วยลดต้นทุนการผลิตและสามารถประหยัดพลังงานได้ จึงเกิดแนวความคิดการประยุกต์ลักษณะของแผ่นกั้น ให้สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและลดความดันตกคร่อมลงได้ จึงมีความจำเป็นที่จะศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีดังนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 Kongkaitpaiboon et al. [1] ได้ทำการทดลองโดยใช้วงแหวนใส่เข้าไปในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบโดยพิจารณาการไหลแบบปั่นป่วน ใช้เลขเรย์โนลด์มีค่าตั้งแต่ 4,000 ถึง 20,000 แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่า Diameter ratio และ Pitch ratio จากผลการทดลองอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อที่ใส่ วงแหวนเข้าไปมีค่าเพิ่มประมาณ 57% ถึง 195%เปรียบเทียบกับท่อเปล่า ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข การใช้งานนอกจากนี้ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่า วงแหวนที่มีค่า Diameter ratio และ Pitch ratio น้อยที่สุดจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันตกมากที่สุด แสดงในรูปที่ 2.1

V. Kongkaitpaiboon, K. Nanan, S. Eiamsa-ard (2010). *Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators*, *Heat and Mass Transfer*, vol.37, pp. 568 – 574

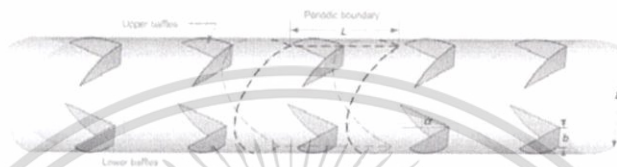


รูปที่ 2.1 circular-ring turbulators

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 Jedsadaratanachai et al.[2] ได้ทำการจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการการไหลของของไหลแบบราบเรียบที่เรย์โนลด์ระหว่าง 100- 2,000 และการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ติดตั้ง V-baffles ทำมุม 45° และทำการศึกษามลกระทบจากการปรับเปลี่ยน Blockage Ratio และ Flow direction จากผลการวิจัย จะได้ค่าประสิทธิภาพประมาณ 3.20 ที่ $B = 0.20$ และ 0.25 ของทิศทางการไหลแบบ V-upstream และ V-downstream แสดงในรูปที่ 2.2

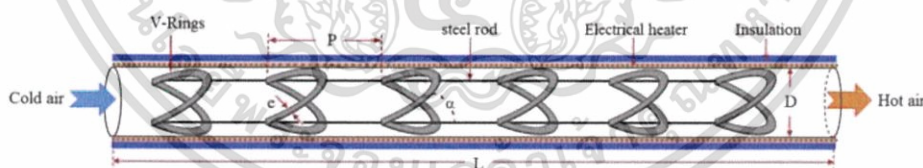
W. Jedsadaratanachai, N. Jayranaiwachira, P. Promvong (2015). 3D numerical study on flow structure and heat transfer in a circular tube with V-baffles, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol23, pp. 342–349



รูปที่ 2.2 V-baffles

2.2.3 Chingtuaythong et al.[3] ได้ทำการทดลองโดยใช้แหวนรูปตัววี (V-rings) ทำมุม 30° ใส่เข้าไปในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้อากาศเป็นของไหลเพื่อศึกษาพฤติกรรมของของไหลในท่อ เช่น การถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยทำการปรับเปลี่ยน Blockage Ratio และ Pitch Ratio จากผลการทดลอง จะได้ค่าประสิทธิภาพที่ 1.63 เท่า เทียบกับท่อเปล่า ที่ Blockage Ratio = 0.1 Pitch Ratio = 1.0 แสดงในรูปที่ 2.3

W. Chingtuaythong, P. Promvong, C. Thianpong, M. Pimsarn (2017). Heat transfer characterization in a tubular heat exchanger with V-shaped rings, *Applied Thermal Engineering*, vol110, pp. 1164–1171

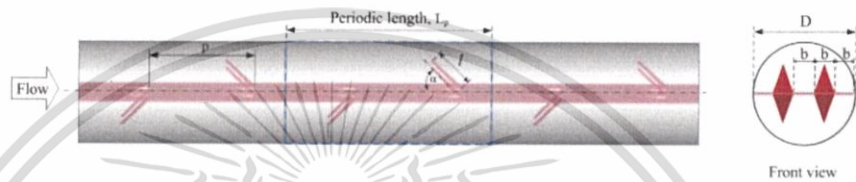


รูปที่ 2.3 V-shaped rings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 Skullong et al.[4] ได้ทำการทดลองโดยใช้แผ่นครีบตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมสองด้าน ทำมุม 30° , 45° , 60° ใส่เข้าไปในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้อากาศเป็นของไหลเพื่อศึกษาพฤติกรรมของของไหลในท่อ เช่น การถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยทำการปรับเปลี่ยน Blockage Ratio และ Pitch Ratio จากผลการทดลอง จะได้ค่าประสิทธิภาพที่ 1.49 เท่า เทียบกับท่อเปล่า ที่มุม 30° Pitch Ratio = 1.0 แสดงในรูปที่ 2.4

S. Skullong, P. Promvong, N. Jayranaiwachirab, C. Thianpong (2016). *Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts, Chemical Engineering and Processing, vol109, pp. 164–177*



รูปที่ 2.4 delta-wing tape

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและ การอธิบายถึงการจำลองการไหลของอากาศและการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านแผ่นกั้นในลักษณะต่างๆ ในทอกลม นอกเหนือจากความเข้าใจพื้นฐานทางการคำนวณ เรายังต้องศึกษาทำความเข้าใจการคำนวณเชิงตัวเลข เพราะว่าเป็นเครื่องมือสำคัญในการหาคำตอบในงานวิจัยนี้

3.2 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

การพัฒนาการคำนวณเชิงตัวเลขได้เกิดขึ้นพร้อมๆ กับการพัฒนาคอมพิวเตอร์ ในปี ค.ศ. 1930 ได้มีการพัฒนาระเบียบวิธีการคำนวณเพื่อการจำลองการไหลรอบๆ ทรงกระบอกไปจนถึงการไหลผ่านปีกเครื่องบิน ในขณะนั้นจะใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Methods, FDM) และระเบียบวิธีมูลฐาน (Finite Element Methods, FEM) ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานในการหาผลเฉลยของอนุพันธ์ย่อย (Partial Difference Equations, PDE) ซึ่งเป็นที่นิยมในการใช้สำหรับการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในต่อมาได้มีการรวบรวมนำเอาองค์ความรู้ทางระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีผลต่างมูลฐานเข้าด้วยกัน เรียกว่าระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Methods, FVM) ทำให้มีโครงสร้างที่สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้น และยังมีความแม่นยำที่สูง จึงเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

3.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

เมื่อเราพิจารณาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในมุมมองของโปรแกรม จะพบว่าเป็นการอัลกอริธึมที่สามารถคำนวณการจำลองของสภาวะการไหลได้ ซึ่งทางโปรแกรมคำนวณที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะมีระบบที่ให้ผู้ใช้งานสามารถป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อัตราการไหล, โมเดล K-epsilon (k- ϵ) Turbulence model, รูปแบบของชิ้นงาน และอื่นๆ ที่ต้องการ จากนั้นจึงนำไปคำนวณเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล

ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-processing) คือขั้นตอนการเตรียมการ และป้อนค่าพารามิเตอร์ การกำหนดปัญหา และค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ต่อไปนี้

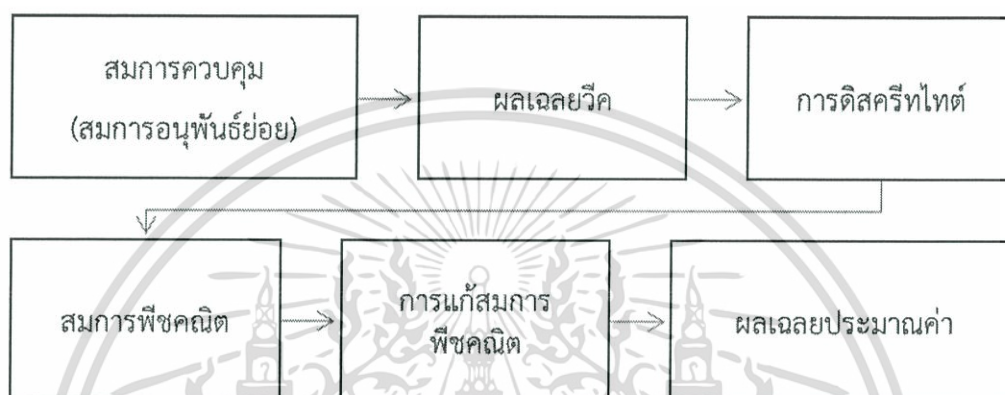
3.3.1.1 การกำหนดรูปแบบของแผ่นกั้นและรูปแบบท่อที่สนใจ เรียกว่า การกำหนดขอบเขตการคำนวณ (Computation domain)

3.3.1.2 การกำหนดจำนวนกริด และรูปแบบการจัดวางกริด (Grid or Mesh) คือการแบ่งการคำนวณ ให้เป็นปริมาตรเล็กๆ ตามรูปแบบการจัดวางกริด เพื่อที่จะให้ได้จำนวนกริดที่เหมาะสมในการคำนวณ และทำให้ผลเฉลยประมาณค่า (Approximation solution) แม่นยำขึ้น

3.3.1.3 การกำหนดแบบจำลองการไหลให้เหมาะสมกับรูปแบบของปัญหา โดยการนำแต่ละแบบจำลองการไหลมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution) เพื่อที่จะได้แบบจำลองที่เหมาะสม

3.3.1.4 การกำหนดคุณสมบัติของของไหล เช่น ในงานวิจัยนี้จะใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ เราต้องกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ค่าคงที่ต่างๆ

3.3.1.5 การกำหนดค่าเริ่มต้น (Initial condition) และเงื่อนไขขอบ (Boundary condition)



รูปที่ 3.1 ความเชื่อมโยงของกระบวนการดิสครีไทต์และผลเฉลยประมาณค่า

3.3.2 ขั้นตอนการประมวลผล

ขั้นตอนการประมวลผล (Solving) คือขั้นตอนที่ต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งในการคำนวณในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยมีขั้นตอนการคำนวณตามรูปที่ 3.1

3.3.2.1 ประมาณตัวแปรไม่ทราบค่าโดยหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน (มักใช้ในปัญหาการไหลแบบปั่นป่วน) และสร้างเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย โดยนำไปรวมกับสมการควบคุมการไหล

3.3.2.2 หาผลเฉลยวิค (Weak solution) ของสมการควบคุมด้วยวิธีน้ำหนักตกค้าง (Weight residual) จากนั้นทำการดิสครีไทต์ โดยประมาณค่าแต่ละเทอมความสัมพันธ์ด้วยวิธีแบบแผนที่เลือกไว้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นสมการพีชคณิต

3.3.2.3 แก้สมการพีชคณิต เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่เรียกว่า ผลเฉลยประมาณค่า (Approximation solution)

3.3.3 ขั้นตอนการแสดงผล

ขั้นตอนการแสดงผล (Post-processing) คือการแสดงผลเฉลยประมาณค่าของตัวแปรที่เราสนใจ และใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ เช่น Velocity vector, Nusselt contour, Temperature contour และอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อจำลองพฤติกรรมของของไหลตามธรรมชาติ เราต้องตระหนักว่าในธรรมชาติ ของไหลมักมีพฤติกรรมที่ซับซ้อน ดังนั้นสิ่งที่ต้องระวังอย่างมากคือ ความถูกต้องของผลเฉลยประมาณค่า จำเป็นจะต้องทำให้มีความแม่นยำมากที่สุด เพราะผลเฉลยประมาณค่าเป็นเพียงค่าประมาณที่ดีที่สุดที่เราสามารถให้คำตอบได้ ไม่ใช่ผลเฉลยที่แม่นยำตรง ดังนั้นคุณสมบัติของการคำนวณเป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงความเที่ยงตรงของผลเฉลยประมาณค่า เมื่อเทียบกับพฤติกรรมของไหลที่เกิดขึ้น สามารถแบ่งได้หลายประการ ดังนี้

3.4.1 ความเข้ากันได้

ความเข้ากันได้ (Consistency) หมายถึงความเหมือน (Equivalent) ระหว่างสมการควบคุม(สมการอนุพันธ์ย่อย) และสมการพีชคณิตที่ผ่านกระบวนการดิสครีไทซ์ เมื่อระยะกริด (Grid spacing) และค่าขั้นเวลา (Time step) ลดลงใกล้ศูนย์ โดยปกติ เราจะเรียกความแตกต่างหลังจากกระบวนการดิสครีไทซ์ว่า ความผิดพลาดแบบทรันเคชัน (Truncation error) ซึ่งจะมีค่าลดลง เมื่อมีความเข้ากันได้มากขึ้น

3.4.2 เสถียรภาพของการคำนวณ

เสถียรภาพของการคำนวณ (Stability) หมายถึงลักษณะของการคำนวณที่มีค่าผิดพลาดน้อยลงเมื่อทำการคำนวณซ้ำ (Damping of error) และเราเรียกความผิดพลาดที่เกิดจากการปัดค่าว่าความผิดพลาดแบบราวน์ออฟ (Round-off error) เช่น ความผิดพลาดในการคำนวณทศนิยมในตำแหน่งที่ 15 ของโปรแกรม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การคำนวณแบบไม่มีเสถียรภาพ ผลของการคำนวณจะมีลักษณะลู่ออก (Divergence) ส่วนใหญ่มักเกิดจากการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ถูกต้อง หรือลักษณะของโมเดลการไหลไม่เหมาะสมกับปัญหาที่เราพิจารณา ซึ่งในการตรวจสอบเสถียรภาพของการคำนวณต้องใช้ความรู้ของทฤษฎีรบกวน (Perturbation theory) เป็นวิธีในการตรวจสอบ

3.4.3 การลู่เข้าของผลเฉลย

การลู่เข้าของผลเฉลย (Convergence) หมายถึง ผลเฉลยที่ประมาณค่ามีแนวโน้มที่เข้าใกล้ผลเฉลยแม่นยำ เนื่องจาก สำหรับปัญหาไม่เชิงเส้น (Non-linear problem) จะยากที่จะตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลยได้ เนื่องจากไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำได้ ดังนั้นเราสามารถตรวจสอบได้โดยวิธีการเปรียบเทียบผลการคำนวณให้มีจำนวนกริดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเรียกว่า ผลเฉลยประมาณค่า (Approximation solution) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามจำนวนกริด จึงสามารถเรียกได้ว่ามีคุณสมบัติของการลู่เข้าของผลเฉลย

3.4.4 การอนุรักษ์

คุณสมบัติของการอนุรักษ์ (Conservation) เป็นคุณสมบัติที่อยู่ในกฎการอนุรักษ์ กล่าวคือ เนื่องจากการคำนวณแบบควบคุม โดยคุณสมบัติการอนุรักษ์เป็นจุดเด่นที่สำคัญของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม เนื่องจากต้องพิจารณาถึงความสมดุลของการส่งถ่ายปริมาณข้ามขอบเขตที่เราพิจารณา เช่น การส่งถ่ายมวลและพลังงานผ่านผิวปิดของปริมาตร ที่แบ่งตามกริด

3.4.5 ความจำกัดขอบ

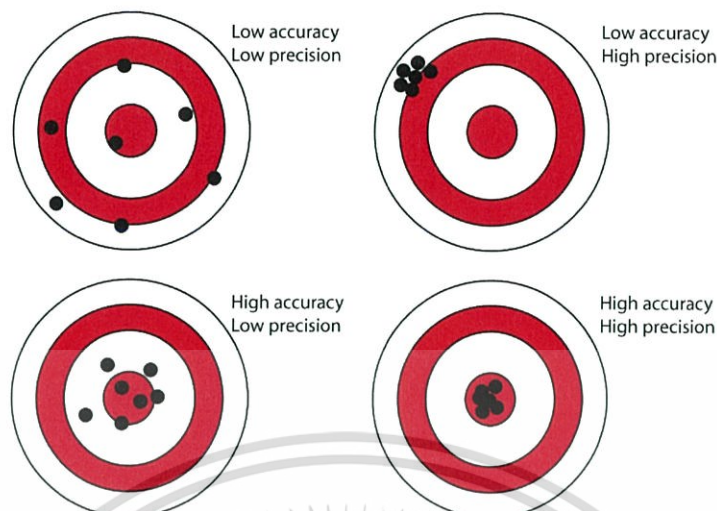
ความจำกัดของ (Bounded ness) หมายถึงผลเฉลยควรจะมีค่าอยู่ในขอบเขตจำกัด เช่น ความเข้มข้น ความหนาแน่น ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ หรือระบบการถ่ายเทความร้อนที่เราทราบ อุณหภูมิ ต่ำสุด-สูงสุด ดังนั้น ผลเฉลยที่ได้ ควรจะมีค่าอยู่ในระหว่างค่าช่วงนั้นด้วยเช่นกัน โดยวิธีการคำนวณที่มีอันดับสูง (Higher order) มีแนวโน้มความจำกัดของต่ำลง ดังนั้นเราจึงไม่ควรเลือกใช้วิธีการคำนวณที่มีอันดับสูงมากเกินไปจนเกินความจำเป็น

3.4.6 ความเสมือนจริง

ความเสมือนจริง (Realizability) หมายถึงความใกล้เคียงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัย เทียบกับพฤติกรรมของธรรมชาติที่ซับซ้อน เช่น แบบจำลองการเผาไหม้ แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน เราควรเลือกแบบจำลองที่มีความเสมือนจริงเมื่อเทียบกับลักษณะทางกายภาพ หากแบบจำลองที่เราเลือกมาใช้ไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมของธรรมชาติ ผลเฉลยที่ได้มา อาจไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมได้อย่างถูกต้อง

3.4.7 ความแม่นยำ

ความแม่นยำ (Accuracy) และความแม่นยำ (Precision) มักถูกกล่าวถึงในงานวิศวกรรม และเพื่อป้องกันการสับสน พิจารณารูปที่ 3.2 แสดงถึงความแตกต่างระหว่างความแม่นยำ และความแม่นยำ โดยเปรียบเทียบว่าถ้าเรายิงเข้ากลางเป้า แสดงว่ามีความแม่นยำสูง ถ้ายังไม่เข้าเป้า แสดงว่ามีความแม่นยำต่ำ และถ้าเรายิงเกาะกลุ่มมาก แสดงว่ามีความแม่นยำสูง แต่ถ้าเรายิงแบบกระจาย แสดงว่ามีความแม่นยำต่ำ ดังนั้นงานวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมจึงควยให้ความสำคัญของความแม่นยำ มากกว่าความแม่นยำ ซึ่งจะช่วยในการวิเคราะห์ที่ได้ถูกต้อง แต่เมื่อพิจารณาจากนอกแบบที่ต้องการความผิดพลาดน้อย เราจึงควรพิจารณาใช้ทั้ง 2 แนวคิดประกอบด้วยกัน



รูปที่ 3.2 แสดงถึงความแตกต่างระหว่างความแน่นอนและความแม่นยำ

วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลสามารถแบ่งปัจจัยของความแน่นอนได้เป็น 3 ปัจจัย ดังนี้

3.4.7.1 ความแน่นอนจากแบบจำลอง (Model accuracy) เกิดจากความเหมือนจริงของแบบจำลองเมื่อเทียบกับพฤติกรรมของธรรมชาติ

3.4.7.2 ความแน่นอนจากดิสครีไทต์ (Discretization accuracy) เกิดจากความเข้ากันได้ของสมการพีชคณิต เทียบกับสมการควมคุม หรือสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations)

3.4.7.3 ความแน่นอนจากการแก้สมการพีชคณิต (Iteration accuracy) เกิดจากการลู่ออกของผลเฉลยประมาณค่า (Approximation solution) กับผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution)

3.5 รูปแบบการจัดวางกริด

รูปแบบของการจัดวางกริดโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

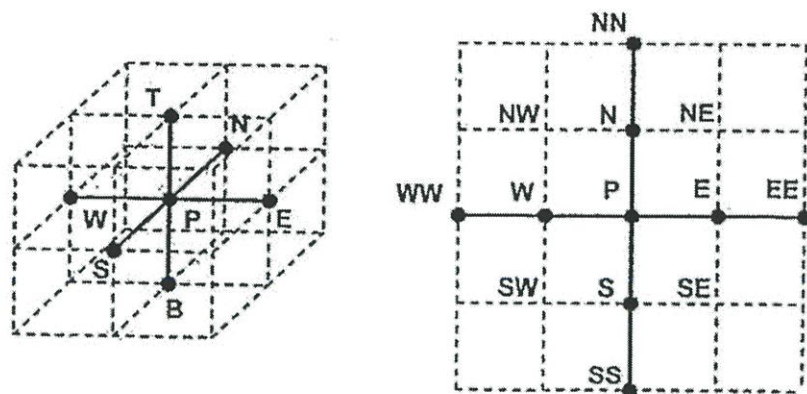
3.5.1 แบบโครงสร้างปกติ (Structured grids)

3.5.2 แบบกลุ่มโครงสร้าง (Block structured grids)

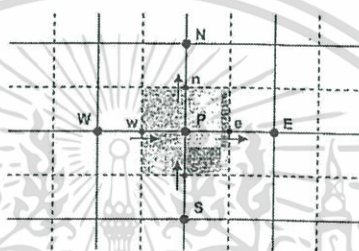
3.5.3 แบบไม่โครงสร้าง (Unstructured grids)

เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจกระบวนการดิสครีไทต์ในหัวข้อถัดไป เราจะใช้รูปแบบการวางกริดดังรูปที่ 3.3

(แบบโครงสร้างปกติ) และเพื่อความกระชับได้ดิสครีไทต์กริด 2 มิติเท่านั้น ซึ่งสามารถขยายไปสู่กริดแบบ 3 มิติได้โดยตรง



รูปที่ 3.3 รูปแบบการวางกริด 3 มิติ และ 2 มิติ



รูปที่ 3.4 บริเวณแรงเงาแสดงถึงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ

จากรูปที่ 3.4 ตำแหน่ง P คือตำแหน่งโนด (Node) ที่สนใจ โดยตัวอักษรพิมพ์เล็ก เช่น w, e แสดงถึงตำแหน่งของปริมาณที่เข้า-ออก จากปริมาตรควบคุม ที่แรงเงาไว้ (Cell volume) เช่น อัตราการไหล อุณหภูมิ เรียกว่า ตำแหน่งเซลล์ (Cell face) ลูกศรที่ปรากฏแสดงทิศเป็นบวกของปริมาณเวกเตอร์ที่ตำแหน่งผิวเซลล์ โดยเราเรียกลักษณะนี้ว่า การจัดเรียงตำแหน่งร่วม (Co-located arrangement) กล่าวคือปริมาณสเกลาร์ และเวกเตอร์มีตำแหน่งเดียวกัน คือ ความเร็ว มวล อุณหภูมิ และความดัน

บทที่ 4

ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและสมการต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ ค่าการถ่ายเทความร้อน, ค่าความดันตกคร่อม และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของของไหลภายในท่อกลมในงานวิจัยนี้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะคำนวณที่กำลังขับเดียวกัน การวิเคราะห์ผลลัพธ์รวมถึงปัญหาที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ในการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่มีลักษณะซับซ้อนและมีความแม่นยำสูงสามารถใช้งานได้ง่าย และแสดงผลได้หลากหลาย

4.2 สมมุติฐาน

จากการศึกษาและวิจัยโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) โดยมีสมมุติฐานในการศึกษาดังนี้

1. ใช้อากาศเป็นของไหลในการทดสอบ
3. แบบจำลองของการไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 3 มิติ
2. การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนและไม่สามารถอัดตัวได้
5. ของไหลมีคุณสมบัติต่างๆ คงที่
4. มีการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงๆ
6. ไม่คิดแรงจากน้ำหนักของของไหลและการสูญเสียเนื่องจากความหนืด
8. ที่ผนังท่อใช้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ 600 W/m^2
7. ไม่คิดถึงการแผ่รังสีความร้อน

4.3 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น

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

4.3.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์ของไหล

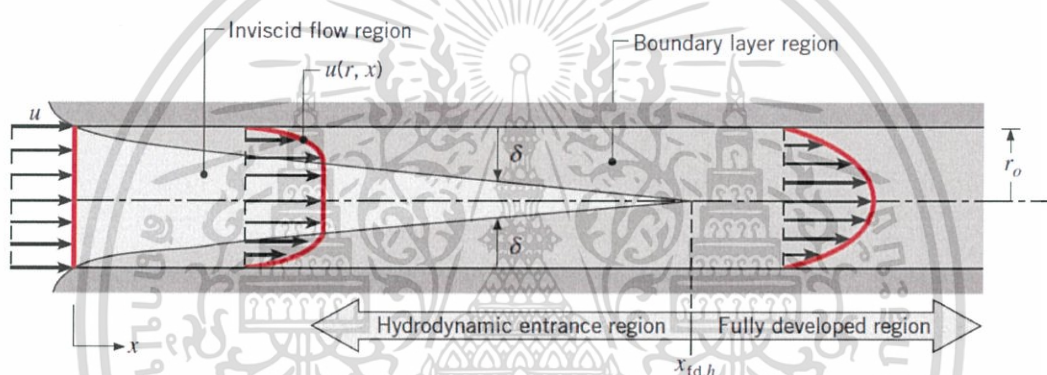
ของไหล (Fluid) หมายถึงสสารที่เปลี่ยนรูปร่างและไหลด้วยความเค้นเฉือน ของเหลวและก๊าซต่างๆก็เป็นรูปแบบหนึ่งของของไหล แต่ต่างกันตรงที่ก๊าซจะเป็นของไหลที่สามารถอัดตัวได้ ส่วนของเหลวนั้นไม่สามารถอัดตัวได้ หรืออัดตัวได้บ้างแต่ต้องใช้ความดันที่สูงมาก ของไหลอัดตัวได้คือของไหลที่มีความหนาแน่นไม่คงที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด เช่น ก๊าซที่อยู่ในภาชนะปิดสนิทเมื่อได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมทางการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานเห็นเว็บไซต์นี้โปรดแจ้งเจ้าหน้าที่ดูแลเว็บไซต์ทันที ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อน ความหนาแน่นของก๊าซจะเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามถ้าหากสูญเสียความร้อนความหนาแน่นจะลดลง ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะของไหลที่อัดตัวไม่ได้เท่านั้น

- ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume, v) คือ ปริมาตรของสารนั้นๆ หารด้วยมวล ซึ่งจะเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น
- ความหนืด (Viscosity, μ) คือ คุณสมบัติการต้านการเคลื่อนที่ของของไหล
- ความหนาแน่น (Density, ρ) คือ มวล (m) ของสารนั้นๆ หารด้วยปริมาตร (V)
- น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight, γ) คือ ความหนาแน่นคูณกับค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) หรือน้ำหนัก (mg) หารด้วยปริมาตร

4.3.2 การไหลแบบราบเรียบหรือการไหลเป็นชั้นๆ (Laminar Flow) กับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)



รูปที่ 4.1 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลผ่านผิวของวัตถุ

จากรูปที่ 4.1 พิจารณาการไหลแบบราบเรียบในท่อกลมที่มีรัศมีคือ r_o 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

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (4.1)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของของไหล, L คือ ความยาวตลอดช่วงของการไหล และ ν คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลนศาสตร์

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

4.3.3 การไหลในท่อกลม

การไหลภายในท่อกลมบริเวณทางเข้าท่อแสดงในรูปที่ 4.2 นั้นจะเห็นว่า ชั้นขอบเขตของความเร็วในการไหลจะพัฒนาเพิ่มขึ้นทีละน้อยๆจนถึงระยะทางค่าหนึ่ง (L_e) ชั้นของความเร็วจะทับซ้อนกันทั้งบนและล่าง หลังจากนั้นการกระจายตัวของความเร็วในการเคลื่อนที่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เรียกว่าการไหลได้พัฒนาอย่างสมบูรณ์ (Fully Developed) เลขเรย์โนลด์ Re สำหรับการไหลภายในท่อนั้นถ้าให้ V เป็นค่าความเร็วเฉลี่ย D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของพื้นที่ตัดขวางท่อแล้วจะได้

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (4.2)$$

เมื่อค่า $\rho\nu$ [$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] เป็นค่าการไหลของสสารต่อพื้นที่หน้าตัดของการไหล สำหรับในกรณีของก๊าซนั้น การเพิ่มความร้อนภายในท่อจะทำให้ก๊าซเกิดการขยายตัวด้วยความเร็ว V ที่เพิ่มขึ้น ค่าของ $\rho\nu$ จะไม่เปลี่ยนแปลงถ้าพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่ และโดยปกติจะถือว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด μ จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันอีกด้วย ส่วนค่าความหนืดเชิงจลนศาสตร์ ν ซึ่งมีค่า μ/ρ ในกรณีของก๊าซจะมีค่าแปรผกผันกับความดันซึ่งจะต้องระมัดระวัง

เมื่อ D_h คือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) มีสมการเป็น

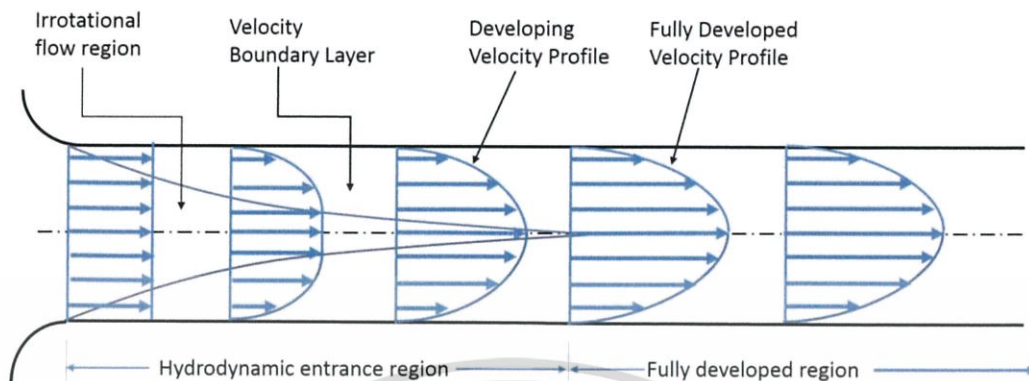
$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (4.3)$$

เมื่อค่า A_c และ P เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของหน้าตัดตามลำดับ

เลขเรย์โนลด์วิกฤติ Re_c ของการไหลภายในท่อที่พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์แล้ว คือเลขเรย์โนลด์ของการไหลที่เปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเปลี่ยนเป็นการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่า $Re_c = 2,300$ หรืออยู่ในช่วงระหว่าง $2,000 - 4,000$ โดยประมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนในการไหล ความขรุขระภายในท่อที่ไหล หรือรูปทรง และสภาพบริเวณทางเข้า ส่วนเลขเรย์โนลด์ที่ต่ำกว่า $2,000$ ไม่ว่าจะท่อจะมีความยาวมากเพียงใด การไหลก็จะไม่เปลี่ยนแปลงไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน จะยังคงรักษาสภาพการไหลแบบเป็นชั้น หรือการไหลแบบราบเรียบต่อไป โดยรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายความเร็วที่พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์การกระจายความเร็วจะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ



รูปที่ 4.2 การไหลอย่างสมบูรณ์ภายในท่อกลม

แต่สำหรับการไหลภายในท่อผิวเรียบ เลขเรย์โนลด์วิกฤติของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_D > 4,000$ และความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวเข้าสู่ช่วงสมบูรณ์หาได้จากสมการ

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

4.3.4 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทาน (friction factor) ของ Moody หรือ Darcy ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติ มีนิยามว่า

$$f_{Darcy} \equiv \frac{(\Delta p / L) D}{\rho u_0^2 / 2} \quad (4.5)$$

เมื่อค่า L คือช่วงความยาวที่วัดค่าความดันตกคร่อม และค่า f_{Darcy} นี้แตกต่างกับค่าตัวประกอบความเสียดทาน f ซึ่งเรียกว่าตัวประกอบความเสียดทานเพนนิ่ง มีสมการดังนี้

$$f = \frac{f_{Darcy}}{4} \quad (4.6)$$

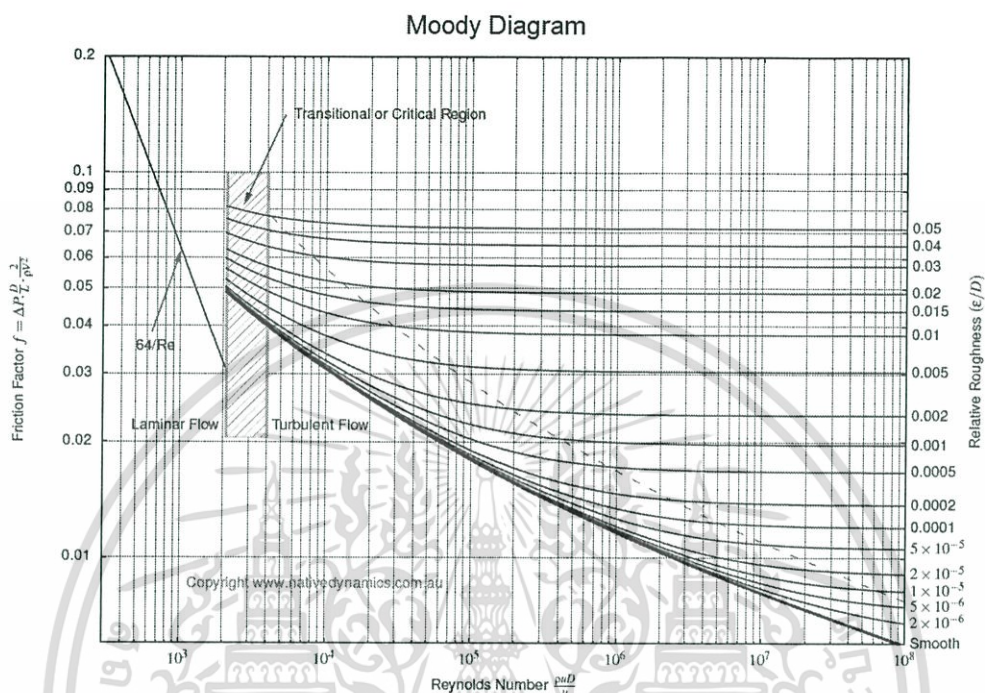
สหสัมพันธ์สำหรับการไหลผ่านพื้นผิวเรียบที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์สูงๆ การพัฒนาของ Petukhov สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$f = (0.79 \ln Re_D - 1.64)^{-2} \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

และตารางแสดงความสัมพันธ์ของตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์หรือ Moody diagram สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลแบบสมบูรณในท่อกลม

ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียความดันที่บริเวณทางเข้าท่อจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของบริเวณทางเข้าท่อ โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 ส่วนบริเวณทางออกของท่อจะมีค่าประมาณ 1.0 ส่วนท่องอ 90 องศา จะมีค่าประมาณ 0.5 - 0.75 นอกจากนี้ในกรณีที่มีการสูญเสียความดัน Δp เกิดขึ้นในท่อ มักจะเขียนในรูปการสูญเสียพลังงานที่ไม่เกิดประโยชน์ต่อหน่วยของเวลา นั่นคือ $\frac{\Delta E_{loss}}{\Delta t}$ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$\frac{\Delta E_{loss}}{\Delta t} = \frac{\Delta p \cdot M}{\rho} = \Delta p \cdot Q \quad (4.8)$$

4.4 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

4.4.1 วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน

วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน แบ่งออกได้เป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำความร้อน หมายถึง ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่

การพาความร้อน หมายถึง กระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล ในอุปกรณ์ความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม โดยมากการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุ มักจะสำคัญกว่า การถ่ายเทความร้อนภายในตัวของไหลเอง ในที่นี้ จึงจะกล่าวถึงการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าว การพาความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งจากการไหลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือความหนาแน่น) และการไหลที่เกิดขึ้นจากปั๊มหรือพัดลม เป็นต้น ซึ่งแบบแรกจะเรียกว่า การพาความร้อนตามธรรมชาติ แบบหลังจะเรียกว่า การพาความร้อนด้วยการบังคับ

การแผ่รังสี วัตถุทุกชนิดจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาว และความเข้มค่าหนึ่งจากพื้นผิวอยู่ตลอดเวลา โดยความยาวและความเข้มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน หากวัตถุอื่นดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ ก็จะได้รับพลังงานความร้อนทำให้อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้เรียกว่า การแผ่รังสี

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน สามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการคงที่ และกระบวนการไม่คงที่ กระบวนการคงที่หมายถึง ในการถ่ายเทความร้อน การกระจายอุณหภูมิภายในตัววัตถุและปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ส่วนในกระบวนการไม่คงที่ ปริมาณเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

4.4.2 สภาวะการถ่ายเทความร้อน

เมื่อของไหลที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอไหลเข้าไปในท่อที่มีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขีดผิวของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิว, T_s คงที่ หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิว, q_s'' คงที่ สภาวะพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น

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

ฟลักซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (4.9)$$

โดยที่ T_s คืออุณหภูมิพื้นผิว

T_m คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

ฟลักซ์ความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างกันรวมทั้งหมดระหว่างผนังกับของไหล ซึ่ง h คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาบางครั้งเรียกว่าการนำผ่านฟิล์ม เพราะความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลที่บริเวณผิวของผนัง ค่า

T_m จะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการไหล นั่นคือ dT_m/dx จะไม่เป็นศูนย์ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ T_m จะเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหล, x ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนจากผิวสู่ของไหล

4.4.3 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างชั้นขีตผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของของไหลต้องเปลี่ยนแปลงตามระยะ x ซึ่งสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อนของอุณหภูมิจะไม่เกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิ เพื่อให้ได้เงื่อนไขของสภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right] = 0 \quad (4.10)$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ
 เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (4.10) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่องทางไหลอาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่หรือ T_s คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนกรณี T_s คงที่จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสถานะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

4.4.4 การพาความร้อน

4.4.4.1 หลักการพื้นฐานของการพาความร้อน

การพาความร้อน หมายถึง การถ่ายเทความร้อนในการอาศัยโดยอาศัยตัวกลางซึ่งเป็นของไหลเคลื่อนที่ ส่วนมากการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุมักจะสำคัญว่าการถ่ายเทความร้อนภายในตัวของของไหลเอง ในที่นี้ จึงจะกล่าวถึงการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าว การพาความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งจากการไหลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือความหนาแน่น) และการไหลที่เกิดขึ้นจากส่งกำลัง เช่น บีมหรือพัดลม เป็นต้น ซึ่งแบบแรกจะเรียกว่า การพาความร้อนตามธรรมชาติ และแบบหลังจะเรียกว่าการพาความร้อนด้วยการบังคับ

4.4.4.2 ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน

เมื่อของไหลที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอไหลเข้าสู่ท่อที่มีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขีตผิวของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิที่ผิว (T_s) คงที่ หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิว (q_s'') คงที่ (ในที่นี้จะขอกกล่าวเพียงสภาวะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่) สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น

โดยพลັกซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวที่จุดใดๆ หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (4.11)$$

โดยที่ T_s คืออุณหภูมิพื้นผิว

T_m คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

พลັกซ์ความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ระหว่างผนังท่อกับของไหล ซึ่ง h คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาบางครั้งเรียกว่าการนำผ่านฟิล์ม เพราะความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลบริเวณผิวของผนังท่อ ค่า T_m จะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการไหลนั้นคือ dT_m/dx จะไม่เป็นศูนย์ ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ T_m จะเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหล x ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนจากผิวสู่ของไหล

4.4.4.3 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

$$\left(\frac{hD}{k} \right) = f \left\{ \left(\frac{u_i D}{\mu / \rho} \right), \left(\frac{C_p \mu}{k} \right) \right\} \quad (4.12)$$

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

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4.13)$$

$$Re = \frac{u_i D}{\mu / \rho} = \frac{u_i \rho}{\mu} \quad (4.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{u / \rho}{k / (C_p / \mu)} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4.15)$$

ในที่นี้ ν เป็นสัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ ($\nu = \mu / \rho$) และ α เป็น Thermal diffusivity ($\alpha = k / (C_p \mu)$) ดังนั้น สมการที่ 4.13 จึงเขียนได้ว่า

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (4.16)$$

กล่าวคือ Nu สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันของ Re กับ Pr

4.4.4.4 ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน

ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน (TEF) คืออัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นที่ผิวทดสอบ (h) เทียบกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวเรียบ (h_0) ที่กำลังขับเดียวกันซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้รับ สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{TEF} = \frac{h}{h_0} \Big|_{pp} = \frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} \Big|_{pp} = \left(\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (4.17)$$

$$\text{TEF} = \frac{(\text{Nu} / \text{Nu}_0)}{(f / f_0)^{1/3}} \quad (4.18)$$

เมื่อ Nu คือ ค่าเลขนีสเซลท์จากการถ่ายเทความร้อน

Nu_0 คือ ค่าเลขนีสเซลท์จากท่อเปล่าผิวเรียบ

f คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทาน

f_0 คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานจากท่อเปล่าผิวเรียบ

4.5 การคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง

สำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่วงที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์นี้ จะใช้การลดจำนวนกริดเซลล์และเวลาที่ใช้ในการคำนวณลง เพื่อลดภาระงานให้น้อยลงในขณะที่ผลการทดลองยังมีความแม่นยำ จึงใช้วิธีการคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงๆ (periodic flow) มาช่วย ซึ่งการวิเคราะห์การไหลในลักษณะนี้ เกิดขึ้นเมื่อรูปทรงที่ใช้เป็นทรงเรขาคณิต โดยรูปแบบที่ต้องการหาค่าผลเฉลยของการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยธรรมชาติแล้ว จะมีการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงนี้สามารถแบ่งได้เป็นการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วและการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.5.1 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว

การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วเป็นลักษณะการไหลเมื่อมีค่าความดันตกคร่อมเกิดขึ้นข้ามขอบเขตการไหลตามแนวทิศทางการไหลและเกิดขึ้นกับการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์แล้ว ลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าประโยชน์ของการนำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

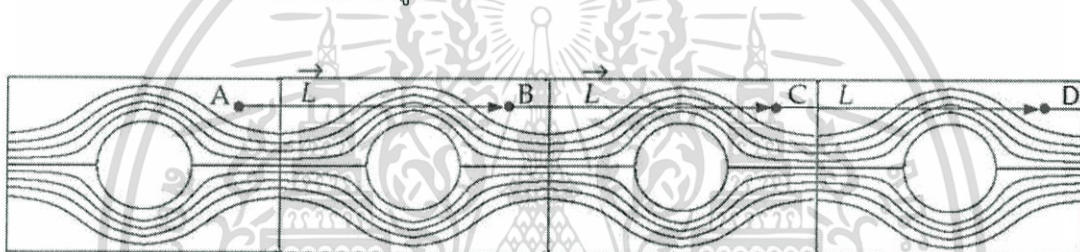
การไหลเช่นนี้มีการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตที่ซ้ำกันต่อกันไปตามแนวทิศทางการไหลและเกิดขึ้นซ้ำกันเป็นวงรอบเรื่อยไป สภาวะการไหลที่ซ้ำเป็นช่วงนี้เกิดขึ้นหลังจากมีช่วงของความยาวขาเข้าที่เพียงพอ โดยขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ของการไหลและรูปร่างทางเรขาคณิตของช่องทางไหล

4.5.1.1 นิยามของความเร็วมืดเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

สภาวะของการไหลซ้ำเป็นช่วงเกิดขึ้นดังกล่าวมานั้น เมื่อรูปแบบการไหลเกิดขึ้นซ้ำกันในช่วงการไหล (L) โดยมีค่าความดันตกคร่อมคงที่ในช่วงโมดูลนั้นๆ ตามแนวทิศทางการไหล นิยามของการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วถูกกำหนดโดยค่าของความเร็วย่อยนั้นจะซ้ำกันโดยตัวมันเอง ดังสมการ

$$u_i(\bar{r}) = u_i(\bar{r} + \bar{L}) = u_i(\bar{r} + 2\bar{L}) = \dots \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (4.19)$$

เมื่อ \bar{r} คือเวกเตอร์บอกตำแหน่ง และค่า \bar{L} คือเวกเตอร์ของความยาวที่ซ้ำเป็นช่วงของขอบเขตการไหลที่พิจารณา แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 รูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง

จากรูปสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\begin{aligned} \mu_A = \mu_B = \mu_C = \mu_D & \quad \tilde{P}_A = \tilde{P}_B = \tilde{P}_C = \tilde{P}_D \\ v_A = v_B = v_C = v_D & \quad P_B - P_A = P_C - P_B = P_D - P_C \end{aligned}$$

4.5.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

สำหรับการไหลแบบมีความหนืดร่วมด้วยนั้น ค่าของความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นจะไม่ซ้ำเป็นช่วงตามนิยามของความเร็ว แต่ค่าของความดันตกคร่อมช่วงของการไหลหรือโมดูลนั้นๆ จะยังคงมีค่าเท่ากัน สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta p = p(\bar{r}) - p(\bar{r} + \bar{L}) = p(\bar{r} + \bar{L}) - p(\bar{r} + 2\bar{L}) = \dots \quad (4.20)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{\nabla} p(\bar{r}) = \beta \frac{\bar{L}}{|\bar{L}|} + \bar{\nabla} \tilde{p}(\bar{r}) \quad (4.21)$$

เมื่อค่า $\tilde{p}(\bar{r})$ คือความดันที่ซ้ำกันเป็นช่วง (periodic pressure) และค่า $\beta|\bar{r}|$ คือส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดัน โดยที่ค่าความดันที่ซ้ำกันเป็นช่วงคือผลต่างของความดันที่บริเวณทางเข้ากับความดันที่บริเวณทางออกซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น และส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดันเป็นผลของแรงที่กระทำต่อของไหลในสมการโมเมนตัม ซึ่งค่า β นั้นจะเป็นค่าที่ไม่ทราบมาก่อนและจะหาค่าได้จากการคำนวณการไหลซ้ำเป็นช่วงจนกระทั่งการไหลมีค่าของอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ตอนเริ่มต้น

4.5.2 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน

การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนตามแนวทิศทางการไหลนั้น สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับกรณีที่มีค่าพารามิเตอร์ความร้อนให้คงที่ที่ผนัง ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างขอบเขตที่ซ้ำเป็นช่วงจะมีค่าคงที่ และมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มของความร้อนสุทธิจากขอบเขตของผนัง

เมื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นซ้ำกันเป็นช่วง สนามอุณหภูมิจะมีความคล้ายคลึงกับสนามของความดันในกรณีของการไหลเป็นช่วงเชิงความเร็ว โดยมีสมการดังนี้

$$\frac{T(\bar{r} + \bar{L}) - T(\bar{r})}{L} = \frac{T(\bar{r} + 2\bar{L}) - T(\bar{r} + \bar{L})}{L} = \sigma \quad (4.22)$$

เมื่อค่า σ คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนได้ในเทอมของการเพิ่มความร้อนทั้งหมดภายในโดเมน, Q ดังสมการ

$$\sigma = \frac{Q}{\dot{m} c_p L} = \frac{T_{\text{bulk, exit}} - T_{\text{bulk, inlet}}}{L} \quad (4.23)$$

เมื่อค่า \dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวลที่กำหนดให้ และค่า T_{bulk} มีนิยามโดย

$$T_{\text{bulk}} = \frac{\int T |\rho \bar{u} \cdot d\bar{A}|}{\int_A |\rho \bar{u} \cdot d\bar{A}|} \quad (4.24)$$

เมื่อ T_{bulk} อินทิเกรตตลอดพื้นที่หน้าตัดของโดเมนการไหลที่ซ้ำเป็นช่วง, A

4.6 สมการพื้นฐานและแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในการคำนวณ เพื่อประมาณผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อนและมีความยุ่งยากในการหาผลเฉลยด้วยวิธีแม่นยำ หลักสำคัญในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับสมการควบคุมได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการโมเมนตัม (Momentum Equation) และสมการพลังงาน (Energy Equation) สมการควบคุมดังกล่าวสามารถบ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพของของไหลและสิ่งต่างๆที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการไหล และสมการควบคุมนี้จะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประมาณผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ สำหรับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Methods, FVM) มาช่วยในการหาคำตอบและอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ

4.6.1 สมการควบคุม

การไหลภายในท่อกลมประกอบไปด้วยสมการควบคุมต่างๆ ได้แก่ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน สามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนที่สภาวะคงตัว (steady state) ได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (4.25)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (4.26)$$

สมการพลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\Gamma + \Gamma_i) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (4.27)$$

เมื่อ $\Gamma = \mu / Pr$ และ $\Gamma_i = \frac{\mu_i}{Pr_i}$ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อนของโมเลกุลและ

สัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อนปั่นป่วน ตามลำดับ

สมการ (3.21) และ (3.22) เรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ส

(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation, RANS) จะสังเกตได้ว่าสมการที่ได้นี้มี

รูปแบบคล้ายคลึงกับสมการนาเวียร์-สโตคส์แบบปกติ เพียงแต่มีเทอมค่าความเค้นของเรย์โนลด์ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Reynolds Stress) $\frac{\partial}{\partial x_i}(-\rho \overline{u_i u_j})$ เพิ่มเข้ามาในสมการ ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วนนั่นเอง

เมื่อทำการเฉลี่ยปริมาณใดๆจากสมการควบคุมตลอดช่วงเวลาช่วงหนึ่งของการไหลจะทำให้เกิดตัวแปรใหม่ ส่งผลให้มีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่ามีจำนวนมากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ ซึ่งก็คือเทอมความเค้นของเรย์โนลด์สที่เพิ่มขึ้นมานั่นเอง ทำให้ไม่สามารถหาผลลัพธ์ที่ต้องการได้ จึงจำเป็นต้องอาศัยสมการของแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) เข้ามาช่วยหาคำตอบ เพื่อให้การแก้ปัญหาที่มีความถูกต้องในระดับที่พอเพียงและครอบคลุมปัญหาความปั่นป่วนได้ ซึ่งจะได้กล่าวถึงแบบจำลองนี้ในหัวข้อต่อไป

4.6.2 แบบจำลองความปั่นป่วน

การหาผลเฉลยสมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ส (RANS) นั้น จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนเข้ามาช่วยในการคำนวณเพื่อหาค่าความเค้นของเรย์โนลด์สที่การคำนวณแบบปกติไม่สามารถทำได้ ซึ่งการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนนี้จะช่วยให้ไม่ต้องหาค่าของการกระเพื่อมแต่จะสนใจเฉพาะส่วนของค่าเฉลี่ยเท่านั้น สำหรับการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นจึงจะสามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำ และใช้ระยะเวลาที่น้อยที่สุด ตัวอย่างแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้กันทั่วไปมีอยู่หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ มาตรฐาน แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ แบบจำลองความปั่นป่วน The Shear-Stress Transport (SST) $k-\omega$ แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds Stress Model (RSM) เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองความปั่นป่วนที่นำมาใช้คือ RNG $k-\epsilon$ เท่านั้น

4.6.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$

แบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากแบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตรฐาน ซึ่งเหมาะกับการนำมาใช้ในการไหลแบบหมุนวน (swirling flow) ดังเช่นในงานวิจัยนี้ ดังนั้นการนำแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ มาใช้วิเคราะห์การไหลในงานวิจัยนี้จึงมีความน่าเชื่อถือกว่าแบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตรฐาน

สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } P_k = \mu_i S^2, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}, \eta = Sk/\epsilon$$

โดย P_k คือขอการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากการเค้นความเร็วเฉลี่ย, $C_{\epsilon 1}$ และ $C_{\epsilon 2}$ คือ ค่าคงที่ σ_k และ σ_ϵ คือเลขพารามิเตอร์ปั่นป่วนสำหรับ k และ ϵ ตามลำดับ

ตัวแปร k ในสมการ (4.24) คือสมการเดียวกันกับแบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตรฐาน ยกเว้นค่าคงที่ แต่ตัวแปร ϵ ในสมการ (4.25) จะแตกต่างจากแบบจำลองมาตรฐานออกไป

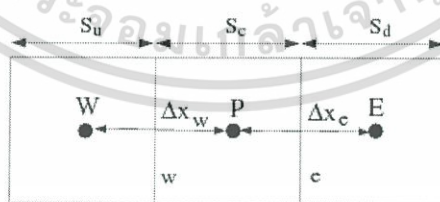
ซึ่งค่าคงที่ $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k และ σ_ϵ สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ ถูกกำหนดให้มีค่าดังนี้

$$C_\mu = 0.0845, C_{\epsilon 1} = 1.42, C_{\epsilon 2} = 1.68, \sigma_k = 0.7194, \text{ และ } \sigma_\epsilon = 0.7194$$

4.6.2.2 วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK

วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) ถูกพัฒนาโดย Brian P. Leonard มักใช้ในการคำนวณค่า ϕ_f ที่ผิวเซลล์ ซึ่งมีอันดับของความแม่นยำที่สูง โดยใช้พื้นฐานของการเฉลี่ยการถ่วงน้ำหนักแบบ Three-point จากวิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับสอง (Second order upwind) ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรที่ศูนย์กลาง สำหรับผิวเซลล์ e ดังรูปที่ 4.5 หากมีการไหลจากทิศทางซ้ายไปขวา ค่า e ที่ผิวเซลล์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_p + \frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_p - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_w \right] \quad (4.30)$$



รูปที่ 4.5 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ

เมื่อค่า $\theta=1$ สมการที่ (4.30) จะกลายเป็นสมการประมาณค่าในช่วงที่ศูนย์กลางอันดับสอง (central second order interpolation) ในขณะที่ $\theta=0$ จะได้สมการของการประมาณต้นลมอันดับสอง แต่โดยทั่วไปแล้วการประมาณค่าแบบ QUICK จะกำหนดให้ $\theta=1/8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2.3 การคู่ควบของความดันและความเร็ว

ในการคำนวณเชิงตัวเลขของพลศาสตร์ของไหลจำเป็นต้องมีกระบวนการวิธีต่างๆ มาช่วยหาค่าสนามความดัน โดยงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) ซึ่งถูกพัฒนาโดย Brian Spalding และ Suhas Patankar นำมาช่วยในการหาคำตอบ โดยกระบวนการวิธี SIMPLE นี้จะเริ่มต้นจากการกำหนดเงื่อนไขขอบ จากนั้นคำนวณค่าของสนามความดันและสนามความเร็ว จากสมการโมเมนตัมและสมการปรับปรุงสนามความดัน เมื่อได้ค่าดังกล่าวแล้วจึงนำมาปรับปรุงค่าของสนามความดันและสนามความเร็ว นำค่าสนามความดันและสนามความเร็วที่ได้ใหม่นั้นป้อนสู่สมการโมเมนตัมและสมการปรับปรุงสนามความดันอีกครั้ง และทำซ้ำต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนกระทั่งกราฟคำตอบทั้งหมดลู่เข้าก็จะได้ค่าสนามความดันและสนามความเร็วที่เป็นไปตามกฎการเคลื่อนย้ายมวลและกฎการอนุรักษ์มวล

กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE นั้น จะเริ่มจากการสุ่มค่าสนามความดัน p^* ตลอดช่วงโดเมนการไหล จากนั้นจึงทำการหาฟลักซ์ที่ผิว J_f^* ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$J_f^* = j_f^* + d_f (P_{c0}^* - P_{c1}^*) \quad (4.31)$$

หากไม่สอดคล้องกับสมการต่อเนื่อง จะดำเนินการแก้ไขโดยการนิยามเทอมของ J_f' เป็นผลต่างระหว่างค่าฟลักซ์ที่ผิวที่ถูกต้องกับค่าฟลักซ์ที่สุ่มขึ้น แสดงได้ดังนี้

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad (4.32)$$

เพื่อให้สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องนั้น กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE จะตั้งสมมติฐานเทอมของ J_f' ดังนี้

$$J_f' = d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (4.33)$$

เมื่อ p' คือค่าปรับปรุงของความดัน

กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE จะแทนค่าจากสมการ (3.32) และ (3.33) ลงในสมการความต่อเนื่อง ซึ่งนำไปสู่สมการแปลงรูปของ p' ในเซลล์ย่อย แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \quad (4.34)$$

เมื่อเทอมของแหล่งกำเนิด b คืออัตราการไหลสุทธิเข้าสู่เซลล์ย่อย ดังสมการ

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f \quad (4.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการค่าปรับปรุงของความดัน p' สามารถเขียนได้โดยใช้ระเบียบวิธีการทำซ้ำ และเมื่อได้ค่าของผลเฉลยแล้ว ค่าความดันและฟลักซ์ที่ผิวของเซลล์ที่ถูกต้องคือ

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (4.36)$$

$$J_f = J_f^* + d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (4.37)$$

เมื่อ α_p คือตัวประกอบภายใต้ความผ่อนคลาย (under-relaxation) สำหรับความดัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การออกแบบแบบจำลองและขั้นตอนการศึกษา

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

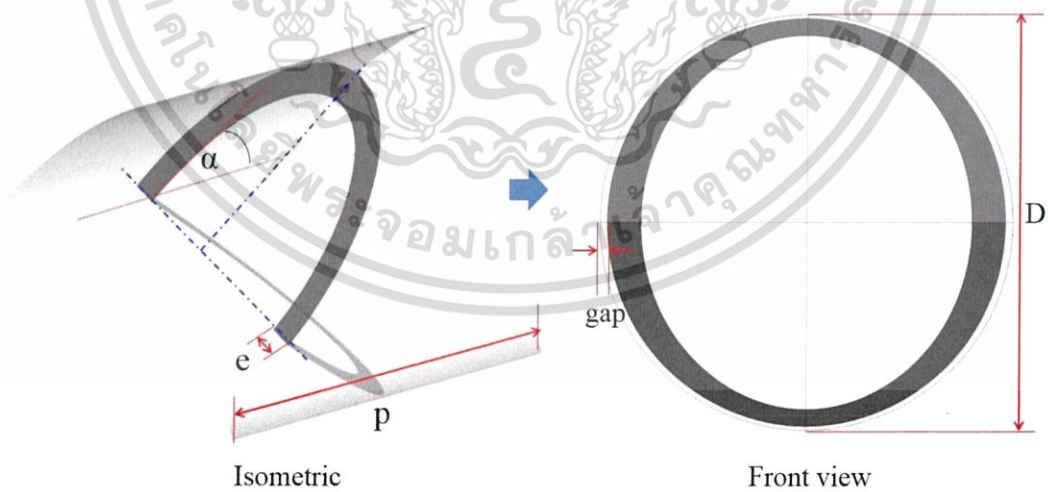
5.1 รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีที่ใช้ในการศึกษา

5.1.1 วงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้เริ่มต้นจากการศึกษาวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม คือ วงแหวนรูปตัววีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรง โดยได้กำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อก (BR) = $e/D = 0.1, 0.15, 0.2$
2. อัตราส่วนพิตช์ (PR) = $P/D = 0.5, 1.0, 1.5$
3. องศาของมุมปะทะ (α) = 30°
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) = 0.05 m. หรือเท่ากับ 50 mm.

โดยที่ e คือ ความสูงครีป , P คือ ระยะห่างระหว่างวงแหวน
เมื่อนำวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิมใส่ภายในท่อกลมผิวเรียบจะสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม

จากการศึกษาวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิมที่ใส่ภายในท่อกลมพบว่า การใส่วงแหวนรูปตัววีภายในท่อกลมสามารถเหนี่ยวนำให้ของไหลเกิดการไหลแบบหมุนวนและเกิดการทำลายชั้นขอบเขตของความร้อน (Thermal boundary layer) จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับเอกสารอื่นเป็นเอกสารที่ส่งวนในเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ เมื่อผู้เขียนได้เห็นแบบฉบับของเอกสารนี้แล้ว ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

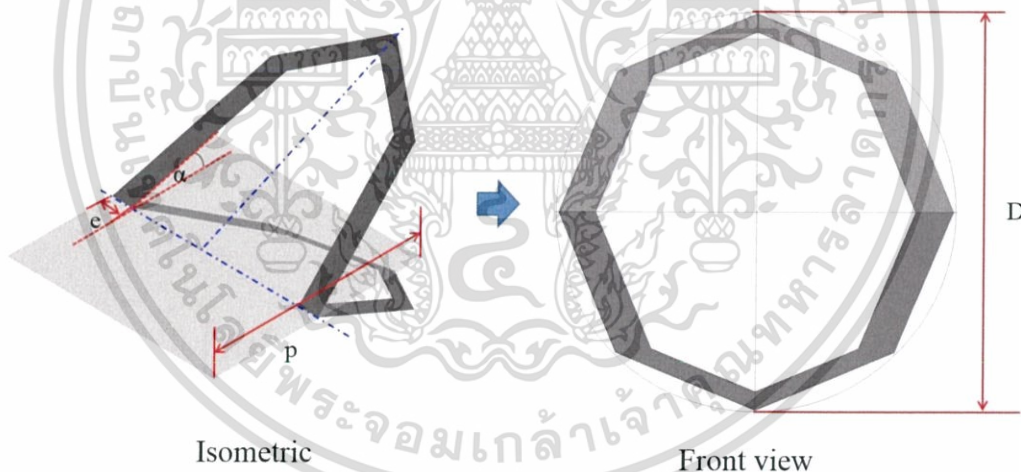
ผนังท่อกลมมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ แต่อย่างไรก็ตามการใส่วงแหวนรูปตัววีภายในท่อจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นมาก แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้ยังถือว่าได้ผลไม่ด้นัก จึงเป็นสาเหตุที่ต้องทำการปรับปรุงรูปทรงของวงแหวนรูปตัววีต่อไป ซึ่งคาดหวังว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้ปรับปรุงจะมีค่าลดลงและมีสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงขึ้น รายละเอียดดังหัวข้อถัดไป

5.1.2 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 (Octagonal rings)

การปรับปรุงรูปทรงของวงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบที่ 1 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมลงจากแบบดั้งเดิม โดยการออกแบบรูปทรงให้มีขอบแหวนด้านนอกและด้านในเป็นรูปทรงแปดเหลี่ยม ซึ่งกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อก (BR) = $e/D = 0.1, 0.15, 0.2$
2. อัตราส่วนพิตช์ (PR) = $P/D = 0.5, 1.0, 1.5$
3. องศาของมุมปะทะ (α) = 30°
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) = 0.05 m . หรือเท่ากับ 50 mm .

โดยที่ e คือ ความสูงครีบ , P คือ ระยะห่างระหว่างวงแหวน การปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 1 (Octagonal rings) ที่ใส่ภายในท่อกลมผิวเรียบจะสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 (Octagonal rings)

เมื่อได้ทำการศึกษวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 (Octagonal-Octagonal) พบว่าการใส่วงแหวนรูปตัววีสามารถเพิ่มการไหลหมุนวนแบบปั่นป่วนภายในท่อได้ จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังท่อกลมมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อเปรียบเทียบกับ การใส่วงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิมพบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้มีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตาม การใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 นี้ ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนลดลงและไม่เหมาะสม

การนำไปใช้งาน จึงมีความจำเป็นต้องทำการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีนี้เพิ่มเติมโดยทำการออกแบบรูปทรงวงแหวนตัววีใหม่ให้มีขอบด้านในเป็นรูปวงกลมแต่ขอบด้านนอกยังเป็นรูปทรงแปดเหลี่ยม

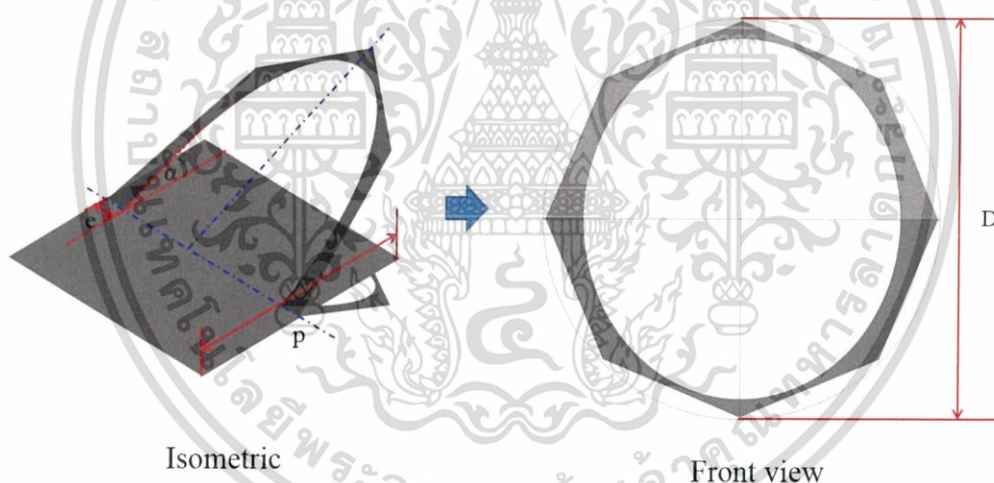
5.1.3 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 (Octagonal-Elliptical rings)

การปรับปรุงรูปทรงของแหวนรูปตัววีแบบที่ 2 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมลงจากแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุง 1 โดยการออกแบบรูปทรงวงแหวนตัววีใหม่ให้มีขอบด้านในเป็นรูปวงกลมแต่ขอบด้านนอกยังเป็นรูปทรงแปดเหลี่ยม โดยกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อก (BR) = $e/D = 0.1, 0.15, 0.2$
2. อัตราส่วนพิตช์ (PR) = $P/D = 0.5, 1.0, 1.5$
3. องศาของมุมปะทะ (α) = 30°
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) = 0.05 m. หรือเท่ากับ 50 mm.

โดยที่ e คือ ความสูงครีบ , P คือ ระยะห่างระหว่างวงแหวน

การปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 2 (Octagonal-Elliptical rings) สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละตัวแปร และรูปแบบ 3 มิติของการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 2 (Octagonal-Ellipse)



รูปที่ 5.3 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 (Octagonal-Elliptical rings)

เมื่อได้ทำการศึกษวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 (Octagonal-Ellipse) พบว่าการใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 สามารถเพิ่มการไหลหมุนวนแบบปั่นป่วนภายในท่อได้ จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังท่อกลมมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อเปรียบเทียบกับการใส่วงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิมพบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้มีค่าลดลงมาก และการใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 นี้ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่าวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 1 แต่ยังมีค่าน้อยกว่าวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม จึงมีความจำเป็นต้องทำการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

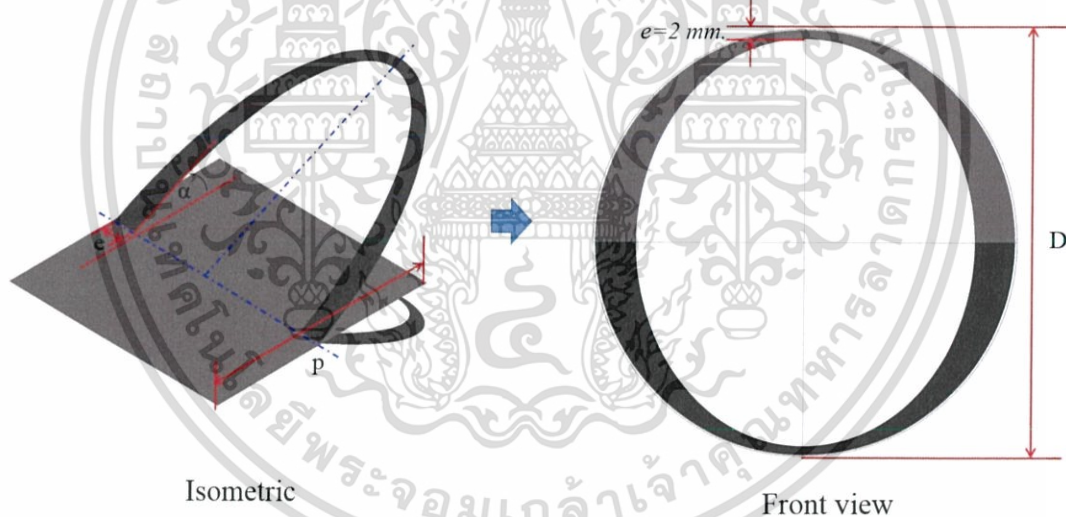
วงแหวนรูปตัววีนี้เพิ่มเติมเพื่อนให้มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้น โดยทำการออกแบบรูปทรงวงแหวนตัววีใหม่ให้มีขอบด้านนอกและขอบด้านในเป็นรูปวงกลม

5.1.4 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 (Oval rings)

การปรับปรุงรูปทรงของวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 3 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้มากกว่าแบบปรับปรุงที่ 2 โดยการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีให้มีขอบด้านนอกและด้านในเป็นรูปวงกลม เพื่อให้มีขนาดของครีบใหญ่ขึ้น โดยตัวแปรต่างๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อก (BR) = $e/D = 0.1, 0.15, 0.2$
2. อัตราส่วนพิทช์ (PR) = $P/D = 0.5, 1.0, 1.5$
3. องศาของมุมปะทะ (α) = 30°
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) = 0.05 m. หรือเท่ากับ 50 mm.

โดยที่ e คือ ความสูงครีบ , P คือ ระยะห่างระหว่างวงแหวน การปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 3 (Oval rings) สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละตัวแปร และรูปแบบ 3 มิติของการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 3



รูปที่ 5.4 ภาพด้านหน้าและภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 (Oval rings)

จากการศึกษาวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 (Oval rings) พบว่าการใส่วงแหวนรูปตัววีภายในท่อสามารถทำให้การไหลหมุนวนแบบปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นและเกิดการกระจายอุณหภูมิของไหลไปสู่บริเวณผิวท่อมากขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังท่อกลมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และการใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 3 นี้ยังส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 2 (Octagonal-Ellipse) ตามที่ได้คาดหวังไว้ เนื่องจากพื้นที่ขวางการไหลจากวงแหวนรูปตัววีเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าแบบปรับปรุง 2 แต่ยังคงให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนใกล้เคียงกับวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงโดยการเปลี่ยนรูปทรงให้มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น

5.1.5 วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 4 (O-rings)

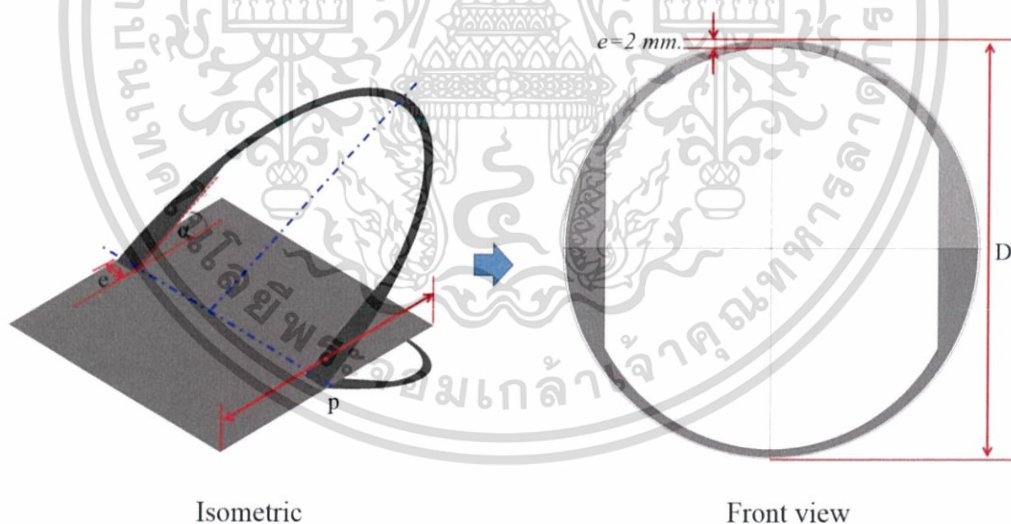
การปรับปรุงรูปทรงของวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 4 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม โดยการปรับปรุงรูปทรงวงแหวนรูปตัววีให้มีขอบแหวนด้านนอกและด้านในเป็นรูปวงกลมและให้จุดยอดคงที่ แต่เพิ่มขนาดของครีbsd้านในค่าตัวแปรต่างๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 4 (O-rings)

1. อัตราส่วนบล็อก (BR) = $e/D = 0.1, 0.15, 0.2$
2. อัตราส่วนพิตช์ (PR) = $P/D = 0.5, 1.0, 1.5$
3. องศาของมุมปะทะ (α) = 30°
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) = 0.05 m. หรือเท่ากับ 50 mm.

โดยที่ e คือ ความสูงครีbsd , P คือ ระยะห่างระหว่างวงแหวน

การปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 4 (O-rings) สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละตัวแปร และรูปแบบ 3 มิติของการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 4



รูปที่ 5.5 ท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 4 (O-rings)

เมื่อได้ทำการศึกษาวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 4 (O-rings) พบว่าการใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 4 สามารถเพิ่มการไหลหมุนวนแบบปั่นป่วนภายในท่อได้ จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังท่อกลมมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรใส่วงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิมพบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้มีค่าลดลงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการใส่วงแหวนรูปตัววีปรับปรุงแบบที่ 4 นี้ ให้สมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่าวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงทุกแบบและมากกว่าแบบดั้งเดิมด้วย

ดังนั้นจากการศึกษาวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงทั้งแบบที่ 1, 2, 3, 4 และแบบดั้งเดิมจึงเป็นเหตุผลให้สรุปได้ว่าวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงแบบที่ 4 (O-rings) มีความเหมาะสมในการศึกษาและน่าสนใจมากที่สุด เนื่องจากวงแหวนรูปตัววีแบบ O-rings ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดและให้ค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับทุกกรณีที่นำมาปรับปรุง อย่างไรก็ตาม การพิจารณาการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทานและลักษณะการไหลของของไหลทดสอบ เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงทั้งแบบที่ 1, 2, 3, 4 และแบบดั้งเดิม จะได้กล่าวถึงในบทต่อไปเพื่อเปรียบเทียบค่าในแต่ละหัวข้อและเพื่อการพิจารณาอย่างเหมาะสม

5.2 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์ปัญหา

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

เลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ย

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_s dA \quad (5.1)$$

ตัวประกอบความเสียดทาน

$$f = \frac{(\Delta p) D}{2 \rho L u_0^2} \quad (5.2)$$

เมื่อ Δp คือค่าความดันตกคร่อม และ L คือความยาวหนึ่งช่วงการไหล

ตัวประกอบของการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน

$$TEF = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \bigg|_{pp} = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (5.3)$$

เลขเรย์โนลด์

$$Re = \rho u_0 D / \mu \quad (5.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์หารูปแบบวงแหวนรูปตัววีที่เหมาะสมจะเปรียบเทียบผลจากค่าที่ได้จากตัวแปรหลักๆ ข้างต้น เพื่อเป็นตัวชี้วัดรูปแบบที่เหมาะสม โดยหลักการวิเคราะห์เบื้องต้นคือ ค่าเลขนัสเซลล์หรือค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต้องมีค่าสูง ค่าตัวประกอบเสียดทานต้องมีค่าต่ำ และค่าตัวประกอบของการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนต้องมีค่าสูง ซึ่งค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะเป็นตัวชี้วัดท้ายสุดที่จะบ่งชี้ได้ว่าแหวนรูปตัววีนี้เหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่

5.3 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

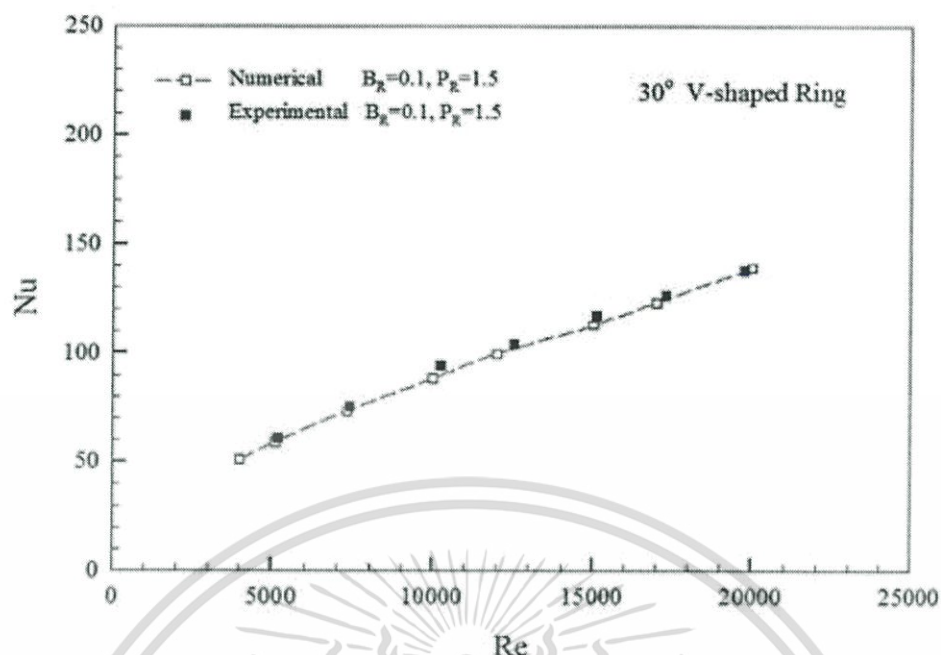
สำหรับการคำนวณการไหลในสามมิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

1. ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ
2. ใช้วิธีการคำนวณแบบปริมาตรสี่เหลี่ยมกับระเบียบวิธี SIMPLE
3. คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า
4. ทำการศึกษาในช่วงเลขเรโนลด์ 4,000 - 20,000
5. กำหนดให้ผนังของท่อกลมมีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่ 600 W/m^2
6. อัตราส่วนระยะห่างระหว่างความหนาครีบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (Pitch ratio, PR) เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5
7. อัตราส่วนการบล็อกการไหล (Blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2

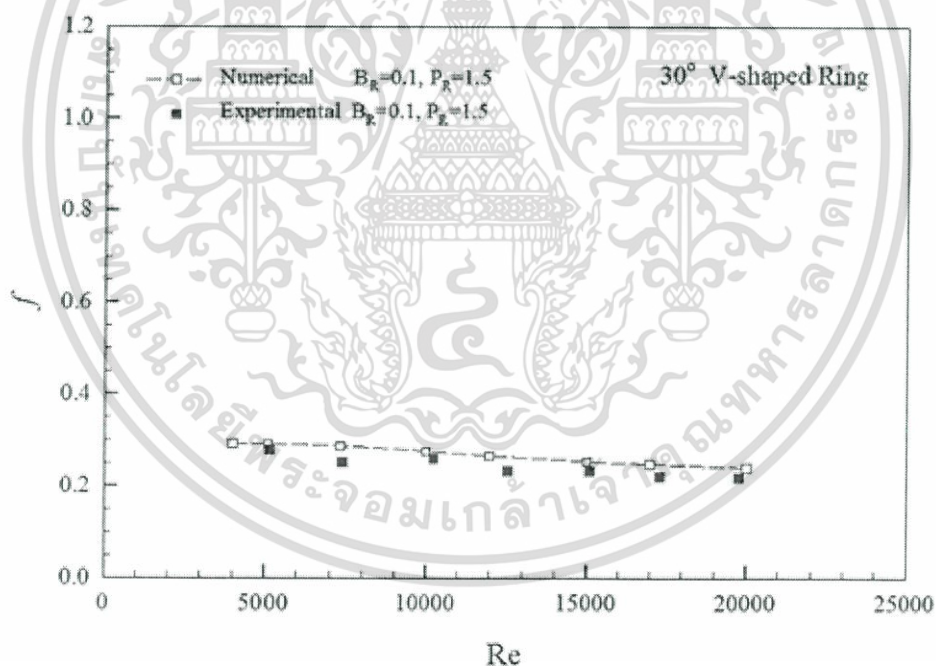
5.4 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข

5.4.1 การตรวจสอบแบบจำลองปั่นป่วน

ก่อนที่จะนำแบบจำลองเชิงตัวเลขไปใช้ในการหาค่าตอบในการทดลองนั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองปั่นป่วนที่ใช้เสียก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลองปั่นป่วนที่ใช้มีความถูกต้องแม่นยำ โดยเลือกเปรียบเทียบผลของแบบจำลองปั่นป่วนกับงานวิจัยในอดีตของ Chingtuaythong [3] และใช้รูปแบบแหวนรูปตัววีที่ติดตั้งในท่อกลมที่อัตราส่วน Blockage ratio (BR) = 0.1 และอัตราส่วน Pitch ratio (PR) = 1.5 เปรียบเทียบกับแบบจำลองปั่นป่วน $k-\epsilon$ ในรูปแบบต่างๆ (ใช้กระบวนการวิธีแบบ QUICK) โดยผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 และ 5.7



รูปที่ 5.6 เลขนัสเซิลท์จากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\epsilon$ และผลการทดลองของ Chingtuaythong [3]



รูปที่ 5.7 ตัวประกอบความเสียดทานจากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\epsilon$ และผลการทดลองของ Chingtuaythong [3]

ซึ่งการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและผลจากการทดลองของ Chingtuaythong พบว่าแบบจำลองปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ และช่องว่างระหว่างครีบกับผนังท่อด้านใน เท่ากับ 0.9 มม. ให้ผลของเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานใกล้เคียงกับการผลทดลองของ Chingtuaythong มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองปั่นป่วนอื่นๆ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้สเซลล์ล์และตัวประกอบเสียดทานเทียบกับผลทดลองอยู่ที่ 2.16% และ 9.31% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ดังนั้นแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้จึงเหมาะสมกับการนำไปทดลองต่อไป

5.5 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม

การตรวจสอบหาจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมกับการทดลองที่มีอากาศเป็นของไหลทดสอบ โดยใส่วงแหวนรูปตัววีเป็นตัวสร้างความปั่นป่วนของการไหลภายในท่อกลม การจัดวางวงแหวนรูปตัววีภายในท่อกลมแบบขวางการไหล กำหนดให้พิจารณาการไหลแบบเป็นคาบ (periodic) โดยคำนวณการไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง หรืออาจเรียกว่าการคำนวณแบบเป็นโมดูล มีขอบเขตการไหลเป็นแบบสมมาตร (symmetry planes) ลักษณะการสร้างรูปแบบกริดและขอบเขตการไหลในงานวิจัยนี้ได้แสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 รูปแบบกริดและขอบเขตการไหลของท่อกลมที่มีการใส่วงแหวนรูปตัววี

รูปแบบกริดที่ใช้สำหรับงานวิจัยที่มีการใส่วงแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมนี้ ได้ใช้การแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) ซึ่งพิจารณาบริเวณที่ติดตั้งให้มีจำนวนกริดที่หนาแน่นโดยการอัดกริดเป็นชั้น Layer และบริเวณที่ห่างออกไปจากผนังก็มีจำนวนกริดเบาบางลง และตีกริดเป็นทรง polyhedral ส่วนการหาผลกระทบของจำนวนกริดที่มีผลต่อคำตอบนั้น ได้ทำการศึกษาโดยใช้จำนวนของกริดที่แตกต่างกันจำนวน 5 ช่วง คือ ที่ 50,432, 100,152, 151,708, 201,554 และ 401,599 ตามลำดับ ซึ่งการทดสอบได้ใช้วิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE และใช้ระเบียบวิธีการคำนวณแบบ QUICK สำหรับการคำนวณ Momentum, Turbulent และ Energy โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังหัวข้อที่ 5.3 เงื่อนไขการรู้เข้าหาค่าตอบของทุกค่าอยู่ที่ 10^{-6} ยกเว้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็นฉบับนี้หรือจะยื่นฟ้องค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ Energy ซึ่งอยู่ที่ 10^{-9} การหาจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมจะดูจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกริดที่ $Re\ 7,300\ BR\ 0.1\ PR\ 1.0$ ตามแบบจำลองแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม ผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 5.9

ตารางที่ 5.1 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า Nu และ f ที่ $Re=7,300$

Grid	Experiment		%Error	
	Nu	f	Nu	f
50432	88.6762	0.4199	0.2129	-1.4492
100152	88.4877	0.4261	0.1489	-0.4926
151708	88.3562	0.4282	0.6463	-0.3789
201554	87.7888	0.4298	0.8364	-0.2991

จากตารางที่ 5.1 ชี้ให้เห็นว่าการสร้างกริดที่จำนวน 50,432, 100,152, 151,708, และ 201,554 ให้ค่า Nu และ f ที่ใกล้เคียงกันและมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1% ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากผลทดสอบจำนวนกริดจากทั้งค่า Nu และ f แล้ว จึงได้เลือกใช้จำนวนกริดอยู่ในช่วง 100,000 ในการศึกษา เนื่องจากผลที่ได้จากการทดสอบจำนวนกริดอยู่ในค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้และไม่จำเป็นต้องใช้จำนวนกริดที่มากกว่านี้เพื่อลดภาระการคำนวณให้น้อยลงจากการเลือกใช้จำนวนกริดที่เหมาะสม

5.6 วิธีการดำเนินการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตที่มีการทดสอบการใส่แหวนรูปตัววีภายในท่อกลมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข
2. สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้
3. หาจำนวนกริดที่เหมาะสมในการศึกษา
4. สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขและปรับปรุงวงแหวนรูปตัววี เพื่อหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน โดยทดสอบที่เลขเรย์โนลด์ 4,000-20,000 เพื่อหารูปแบบการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีที่เหมาะสม
5. เลือกรูปแบบการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีที่เหมาะสมและปรับอัตราส่วนพิทช์ อัตราส่วนบล็อกการไหล มุมปะทะ เป็นต้น และทดสอบที่เลขเรย์โนลด์ 4,000 ถึง 20,000 เพื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน
6. บันทึกข้อมูลค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากการทดลองในแต่ละกรณี
7. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้เพื่อเปรียบเทียบผลและเลือกรูปแบบการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ โดยวิเคราะห์จากค่าการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของเลขนัสเซลท์ ค่าความดันตกคร่อมซึ่งอยู่ในรูปของตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

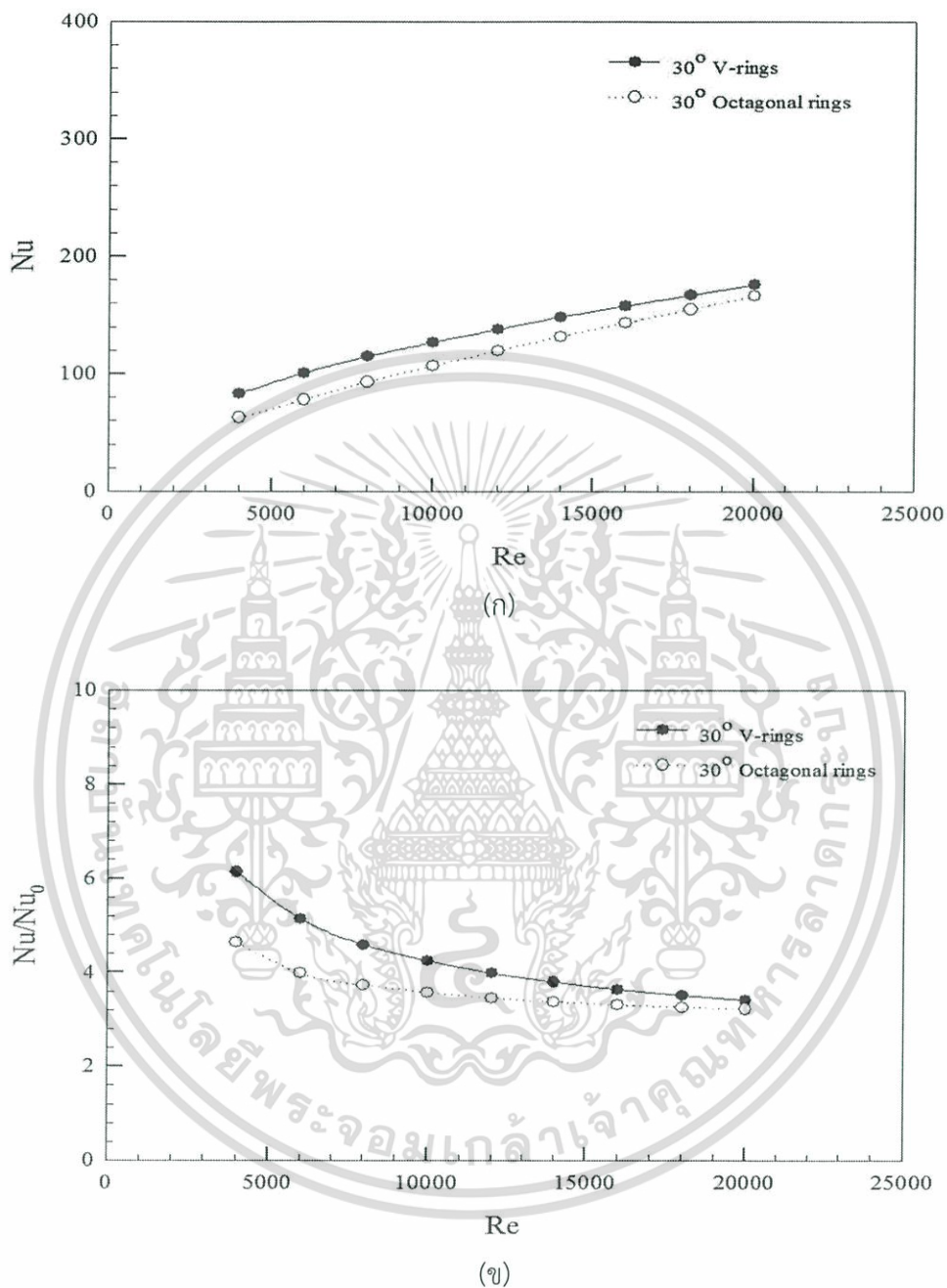
จากการศึกษา ค้นคว้างานวิจัยพบว่า การใส่วงแหวนรูปตัววีในรูปทรงต่างๆภายในท่อกลมสามารถช่วยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าตัวประกอบเสียดทานยังคงมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีรูปแบบต่างๆที่ได้กล่าวมาในบทที่ 5 ซึ่งในบทที่ 6 นี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการศึกษาด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหล ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม สำหรับการใส่วงแหวนรูปตัววีรูปแบบต่างๆภายในท่อกลม ซึ่งจะพิจารณาในส่วนของการปรับปรุงรูปทรงวงแหวนรูปตัววีเป็นหลัก

การแสดงผลการศึกษาจะแสดงด้วยรูปภาพหรือกราฟ เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายต่อการเปรียบเทียบที่ชัดเจน ซึ่งจะแสดงผลและอภิปรายผลที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีรูปแบบต่างๆภายในท่อกลม ทั้งแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงใหม่ของวงแหวนรูปตัววีในรูปแบบต่างๆ การกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีในรูปแบบต่างๆภายในท่อกลม กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ และอภิปรายผลเปรียบเทียบความแตกต่างและสรุปผลแต่ละรูปแบบของวงแหวนรูปตัววีในรูปทรงที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น

6.1 วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม)

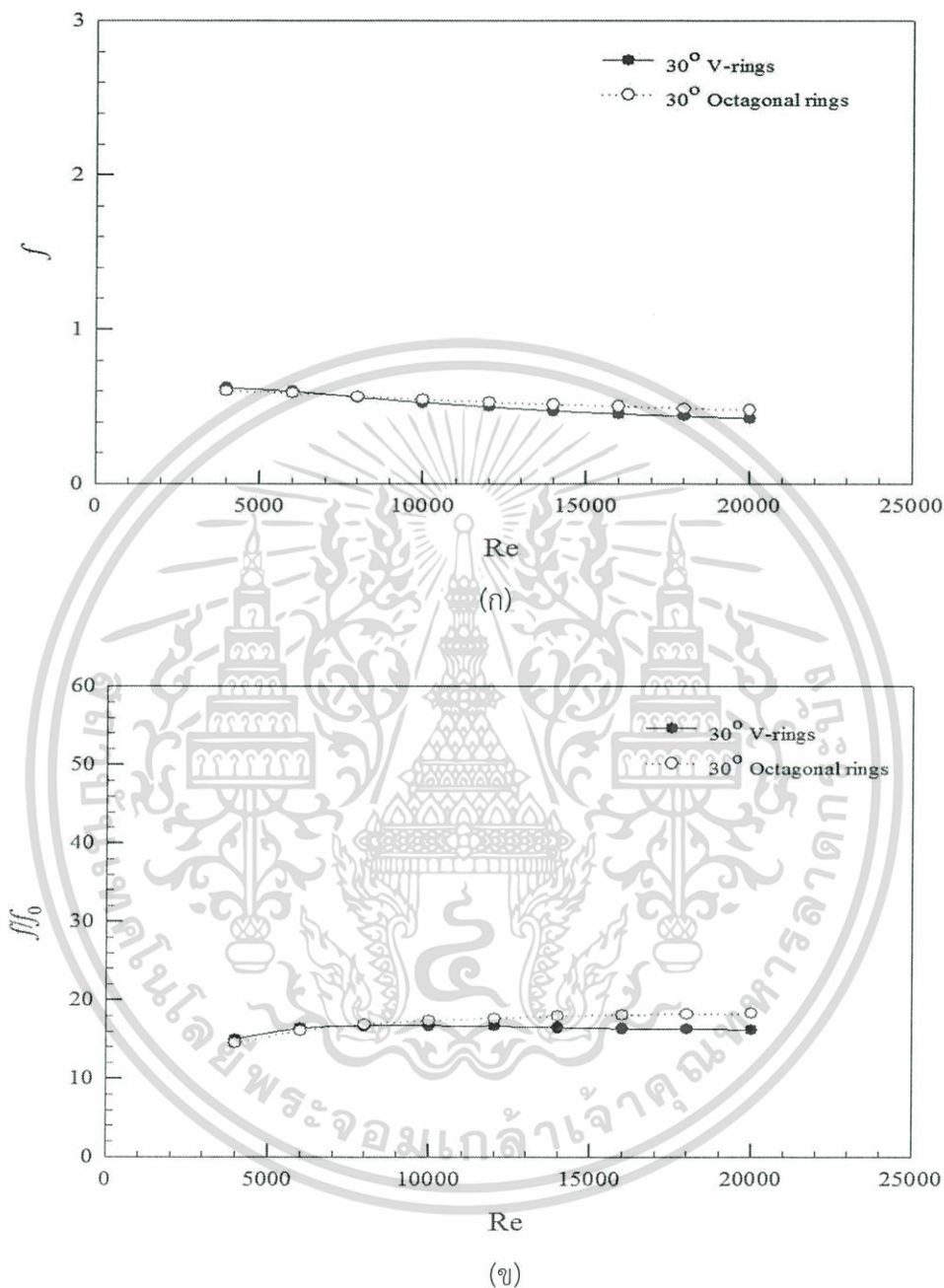
6.1.1 รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม)

จากการศึกษาการใส่วงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิมทำให้ทราบว่าสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ แต่ยังมีปัญหาค่าตัวประกอบเสียดทานที่ยังสูงและการกระจายของอุณหภูมียังน้อยที่บริเวณด้านหน้าหรือบริเวณทางเข้าของวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม) คือการเปลี่ยนรูปทรงของวงแหวนรูปตัววี โดยเปลี่ยนจากวงแหวนแบบดั้งเดิมเป็นแปดเหลี่ยม เพราะรูปทรงแปดเหลี่ยมมีเงื่อนไขเหมือนกับรูปทรงวงแหวนแบบดั้งเดิม กล่าวคือ มีขนาดความสูงของวงแหวนเท่ากันตลอดวงแหวนเหมือนวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม ซึ่งคาดหวังว่าจะลดพื้นที่ขวางการไหลให้น้อยลงและช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานลงได้ จึงได้ทำการทดลองค่า BR ของวงแหวนรูปตัววีที่อัตราส่วน 0.1, 0.15 และ 0.2 ทั้งสิ้น 3 ขนาด โดยค่าเลขนัสเซลท์และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จะถูกนำเสนอรูปที่ 6.1, 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ



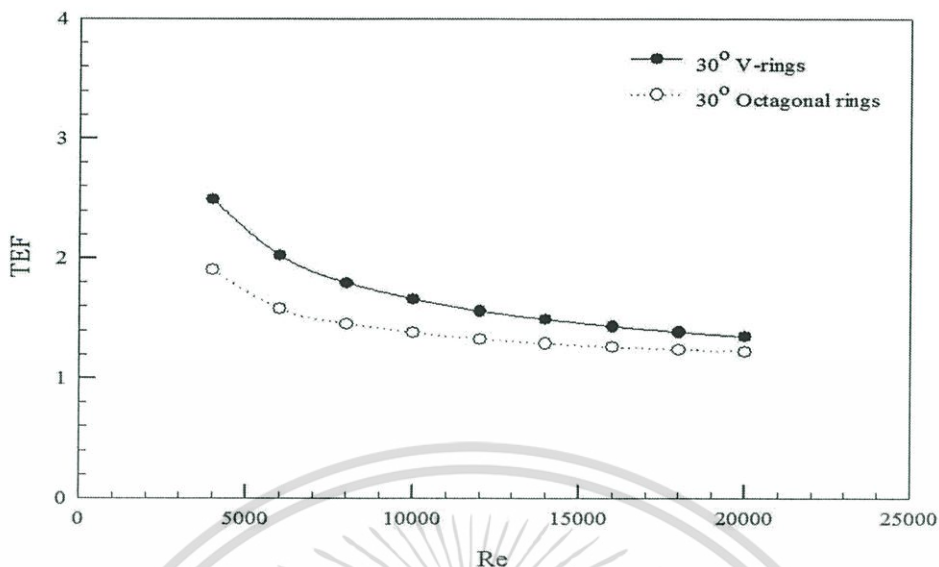
รูปที่ 6.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิมที่ BR=0.1, PR=0.5 (ก) ค่าเลขนัสเซลท์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม ที่ BR=0.1, PR=0.5 (ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ที่ $BR=0.1$, $PR=0.5$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 เทียบกับแบบดั้งเดิม

จากผลที่ได้ดังรูปที่ 6.1-6.3 สามารถสรุปได้ว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดในช่วง 1.91-1.22 ที่ $Re = 4,000-20,000$ แต่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 นั้นก็ยังต่ำกว่าวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม ลักษณะการไหลวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ภายในท่อกลมแสดงตามตัวอย่าง ดังรูป 6.4



รูปที่ 6.4 ท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

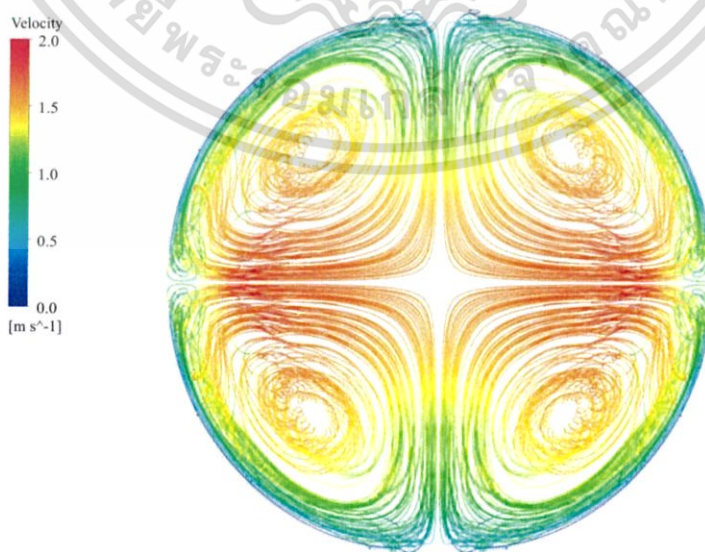
6.1.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่วงแหวนแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม)

เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 จะแสดงในรูปแบบ 3 มิติ เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลภายในท่อกลมผิวเรียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ภายในท่อกลมสามารถทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะการไหลเกิดการหมุนวนที่ด้านทางเข้าของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 มีมากกว่าแบบดั้งเดิม หากมองภาพในแนวระนาบจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นว่ามีกระแสการไหลหมุนวน 2 คู่ ที่ช่วยเหนี่ยวนำกระแสการไหลให้รุนแรงและกระแทกเข้ากับผิวท่อกลมดังแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 6.6

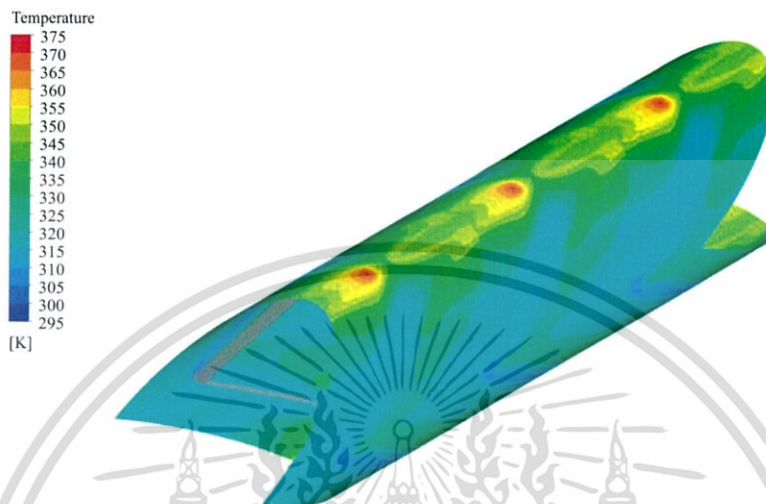


รูปที่ 6.6 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม)

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ภายในท่อกลมผิวเรียบ จะถูกพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ และแสดงให้เห็นดังรูปที่ 6.7

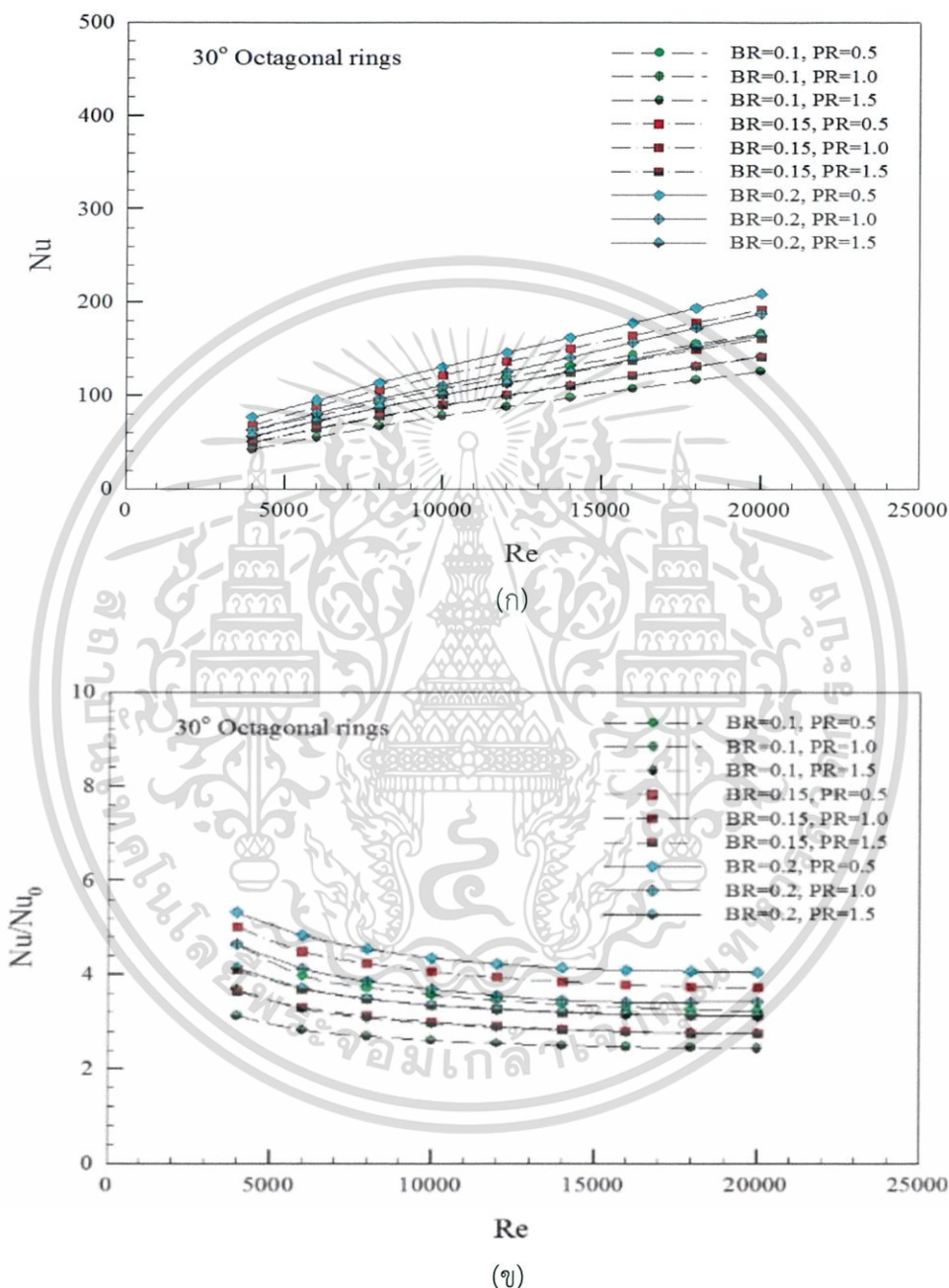


รูปที่ 6.7 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1

จากรูปที่ 6.7 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ $Re = 4,000$ เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่า เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 หรือทรงแปดเหลี่ยมภายในท่อกลม จะช่วยให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิได้มากยิ่งขึ้น สิ่งเกิดได้จากคอนทัวร์สี่เหลี่ยมและสี่ฟ้ายี่ที่มีมากขึ้นเมื่อใส่ด้วยวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น เป็นผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูงได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังปรากฏคอนทัวร์สีแดงบริเวณด้านบนและด้านล่างของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 แสดงให้เห็นว่าบริเวณด้านบนและด้านล่างของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลที่น้อยเกินไปจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิดี้น้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

6.1.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลล์ท์ (Nu) และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ (Nu/Nu_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งถูกพิจารณาที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2$, $PR = 0.5, 1.0, 1.5$ และ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.8



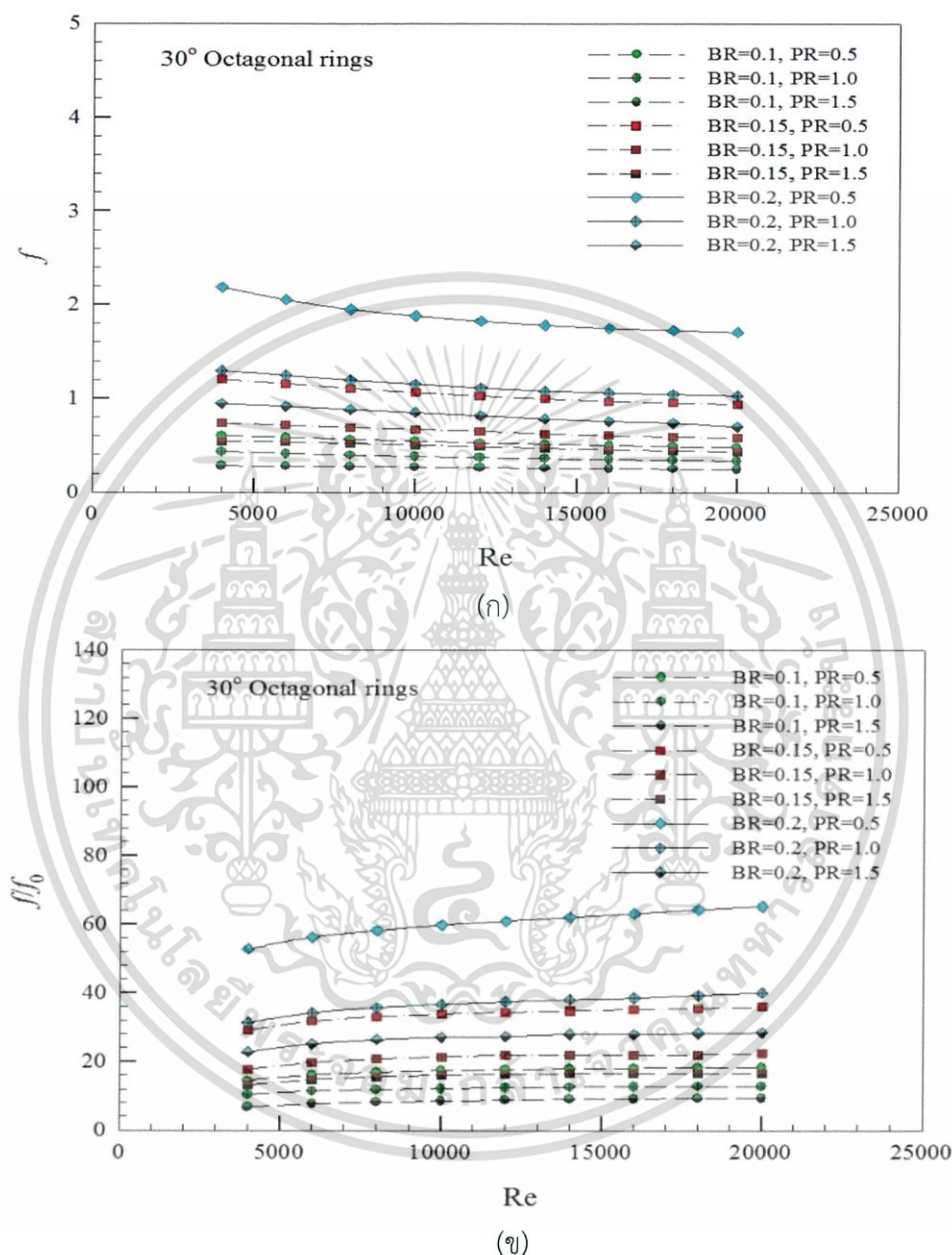
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (ก) ค่าเลขนัสเซลล์ท์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลล์ท์สูงสุดอยู่ในช่วง 72.10-209.25 ที่ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์สูงสุดอยู่ในช่วง 5.32-4.05 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีทรงแปดเหลี่ยมเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2$, $PR = 0.5, 1.0, 1.5$ และ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1

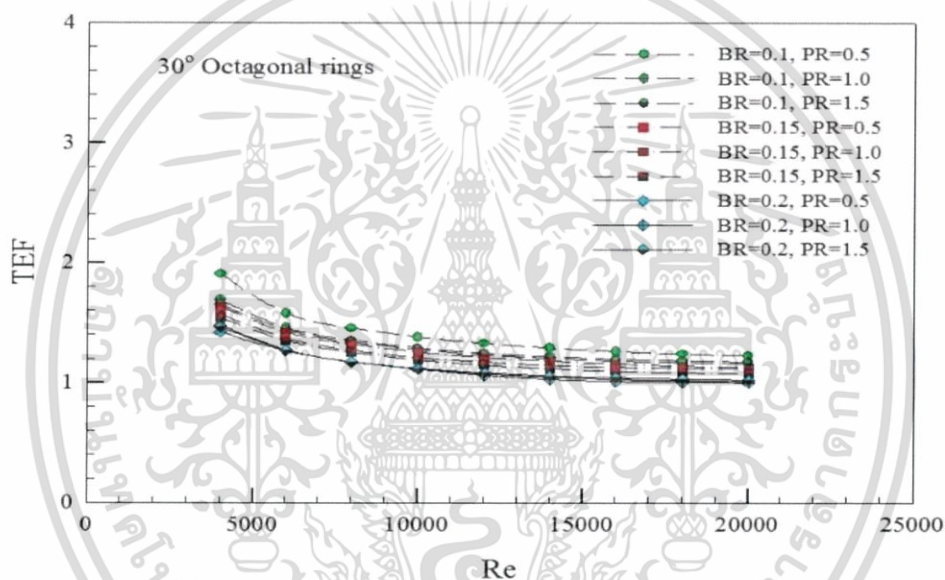
(ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.28-0.24 ที่ $Re = 4,000$ - $20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 6.78-9.37 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ $Re = 4,000$ - $20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 เช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ (Nu/Nu_0) ร่วมกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) พบว่าการใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ที่แตกต่างมากเมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิม แต่ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่ลดลงเล็กน้อย ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสำหรับชีวิตถึงประสิทธิภาพที่ได้ และเพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ว่ามีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบดั้งเดิมหรือไม่

6.1.6 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่ BR = 0.1, 0.15, 0.2 , PR= 0.5, 1.0, 1.5 และ Re = 4,000 ถึง 20,000 แสดงได้ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1

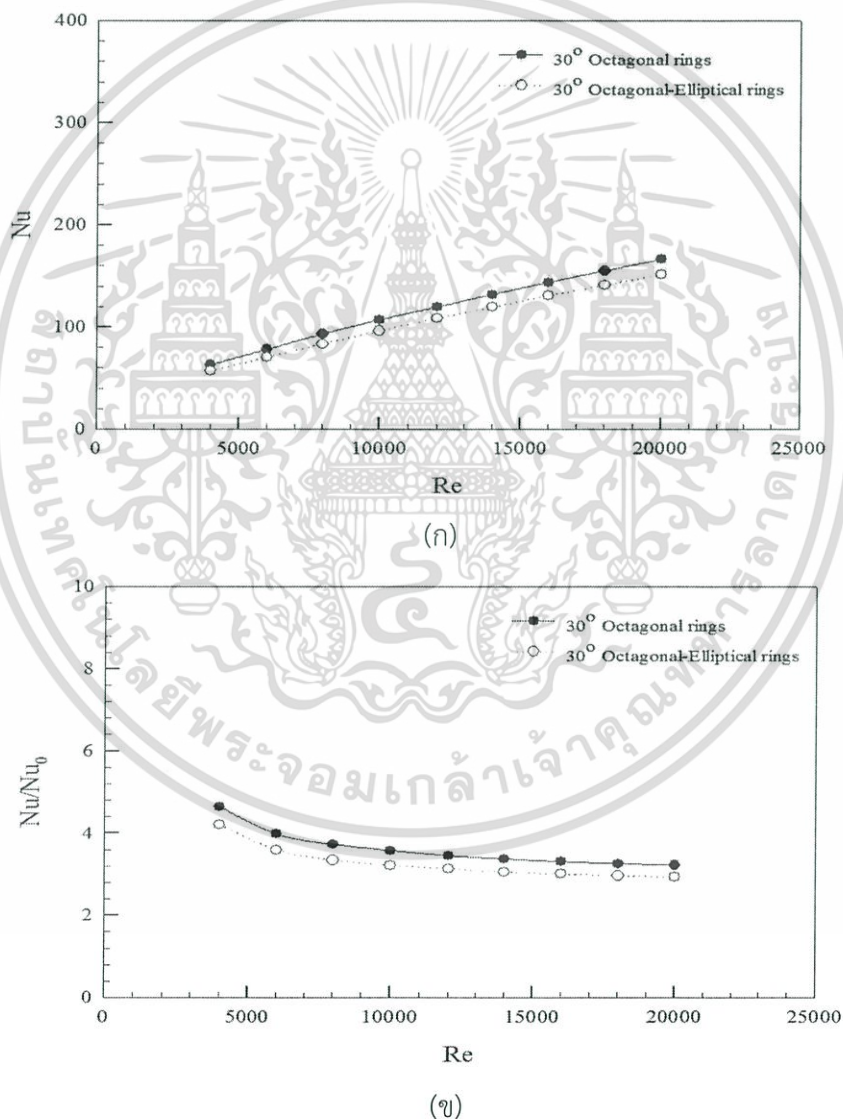
เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 1.91-1.22 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ Re = 4,000-20,000 ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1

จากการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 มีผลช่วยให้ค่าตัวประกอบเสียดทานลดลง แต่ค่าเลขนัสเซลล์ท์และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ลดลงมาก ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้ยังมีค่าที่ไม่สูงพอสำหรับการนำไปใช้และน้อยกว่าแบบวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม จึงได้ทำการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 ขึ้น โดยการลดขนาดวงแหวนรูปตัววีบริเวณขอบด้านในของวงแหวนรูปตัววีให้เหมือนกับแบบดั้งเดิม จุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมลง โดยการลดพื้นที่ของวงแหวนรูปตัววี และยังสามารถสร้างความปั่นป่วนให้กับของไหลได้เช่นเดิม ซึ่งคาดหวังว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะเพิ่มสูงมากขึ้น

6.2 วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี)

6.2.1 รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี)

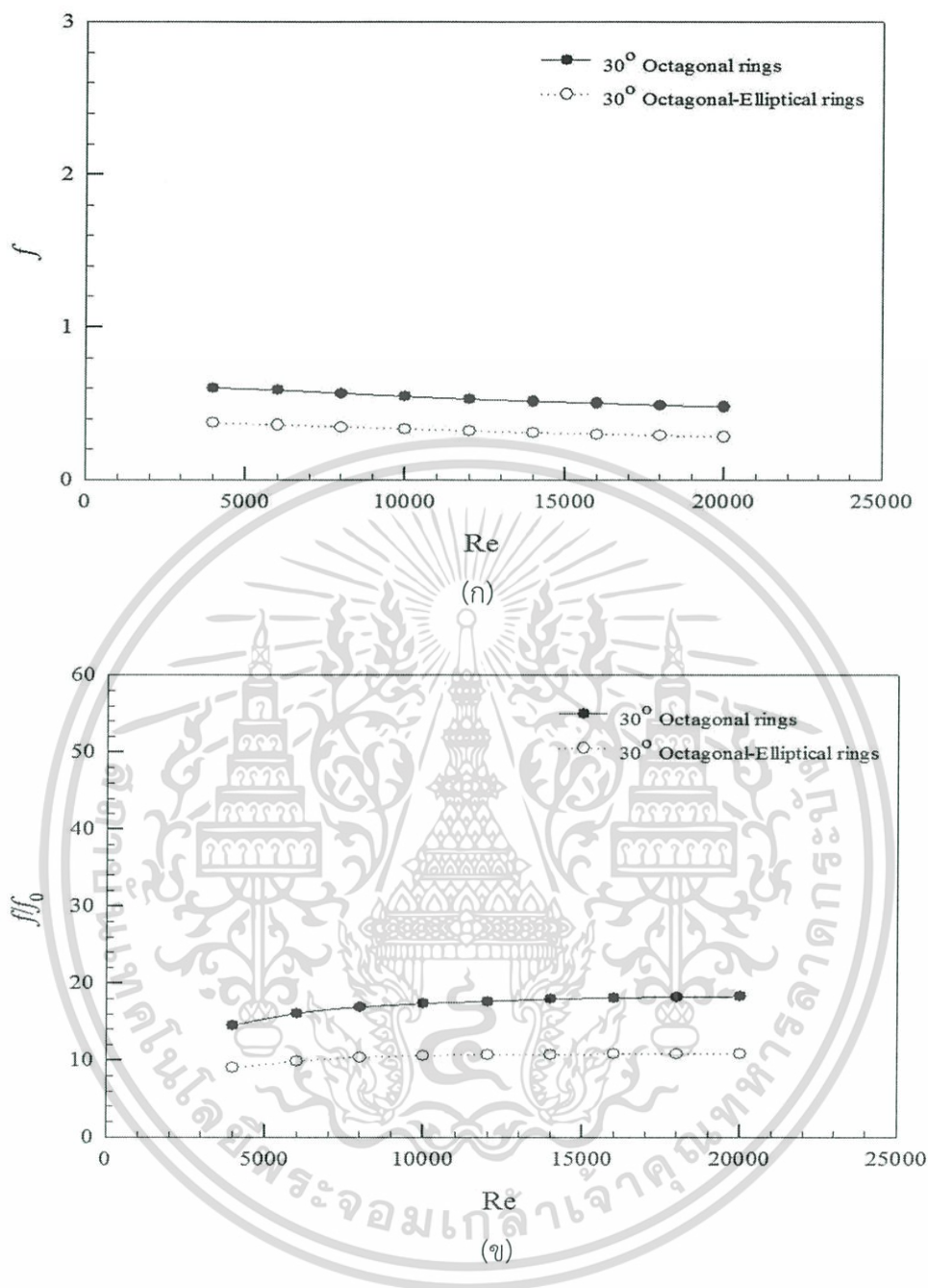
จากการศึกษาการไหลวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 เมื่อพิจารณาแล้วค่าตัวประกอบเสียดทานที่ยังสูงเกิดมาจากวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ได้ขบวนการไหลของของไหลอยู่มาก จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีเพื่อลดพื้นที่ที่ขบวนการไหลลง เพื่อลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อน จึงเป็นที่มาของการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 โดยการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีที่ขอบด้านในวงแหวนให้เป็นทรงโค้งมนเหมือนแบบดั้งเดิม จึงได้ทำการทดลองปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 โดยค่าเลขนีสเซลล์ท์และอัตราส่วนเลขนีสเซลล์ท์ ค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จะถูกรวบรวมในรูปที่ 6.11, 6.12 และ 6.13 ตามลำดับ



รูปที่ 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ที่ BR=0.1, PR=0.5

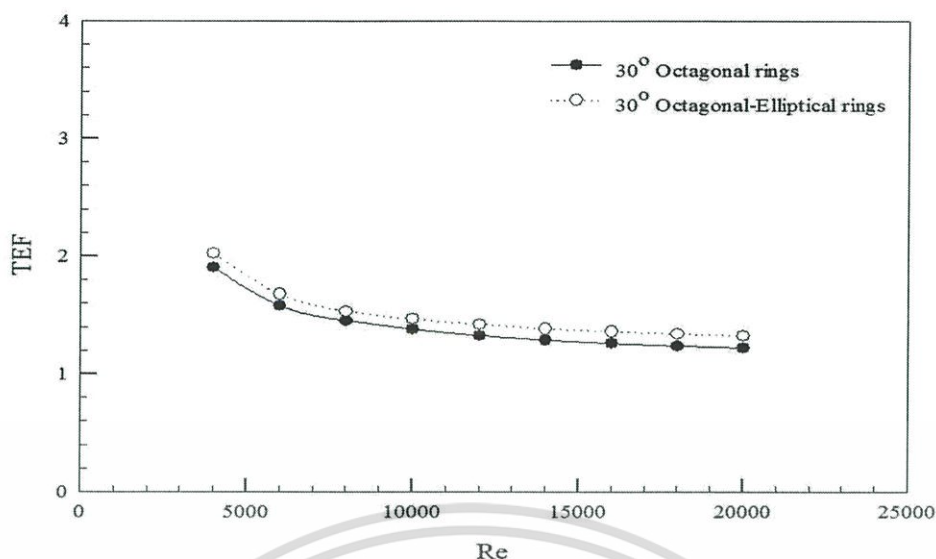
(ก) ค่าเลขนีสเซลล์ท์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลล์ท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 ที่ $BR=0.1$, $PR=0.5$
 (ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 สมรรถนะเชิงความร้อนของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 เทียบกับแบบปรับปรุงที่ 1

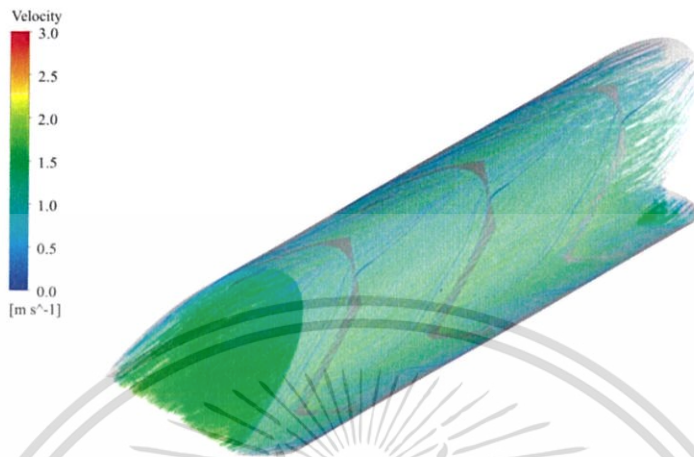
จากผลการเปรียบเทียบข้างต้นพบว่าวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 ที่ $BR = 0.1$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด อันเนื่องมาจากสามารถสร้างการไหลที่ปั่นป่วนซึ่งช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน อีกทั้งยังลดค่าตัวประกอบเสียดทานได้มากกว่าแบบปรับปรุงที่ 1 ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าที่มากที่สุด ดังนั้นในการศึกษาวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 หรือทรงแปดเหลี่ยม-วงรีจะยึดที่ Blockage ratio ที่น้อยที่สุด ($BR = 0.1$) เป็นสำคัญ ลักษณะการไหลวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 ภายในท่อกลมแสดงตามตัวอย่าง ดังรูปที่ 6.14

รูปที่ 6.14 รูปทรงของท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

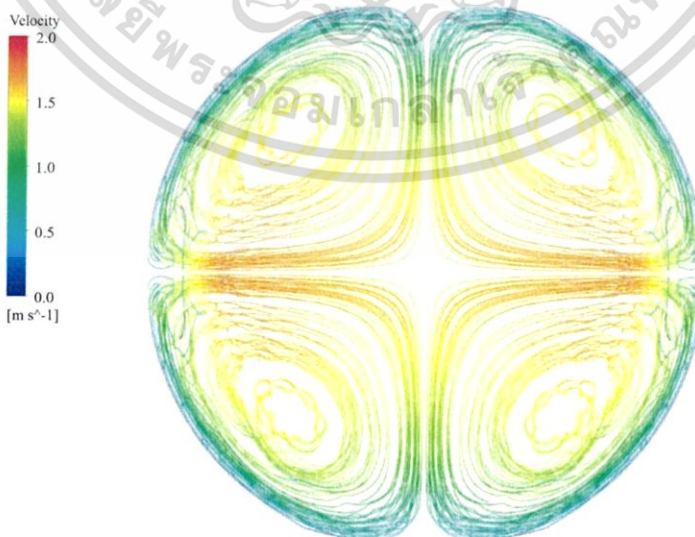
6.2.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี)

เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 จะแสดงในรูปแบบ 3 มิติ เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลภายในท่อกลมผิวเรียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี) ภายในท่อกลมสามารถทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะการไหลเกิดการหมุนวนที่ด้านทางเข้าของวงแหวนรูปตัววีทรงแปดเหลี่ยม-วงรีมีมากกว่าแบบดั้งเดิม มีกระแสการไหลหมุนวน 2 คู่ ที่ช่วยเหนี่ยวนำกระแสการไหลให้รุนแรงและกระแทกเข้ากับผิวท่อกลม หากมองภาพในแนวระนาบจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นว่ามีกระแสการไหลหมุนวน 2 คู่ ที่ช่วยเหนี่ยวนำกระแสการไหลให้รุนแรงและกระแทกเข้ากับผิวท่อกลมดังแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 6.16

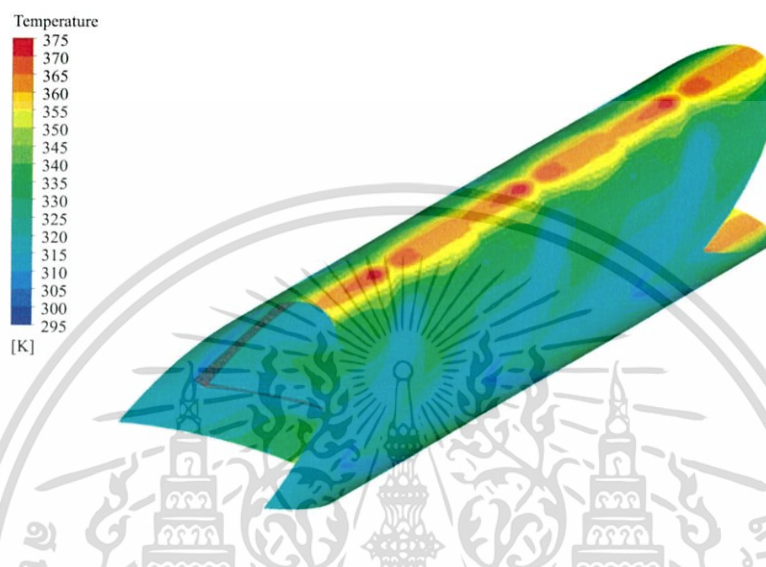


รูปที่ 6.16 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี)

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 หรือการปรับปรุงทรงแปดเหลี่ยม-วงรีที่ทางเข้าวงแหวนรูปตัววีภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิแล้วนั้นจะสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 6.17

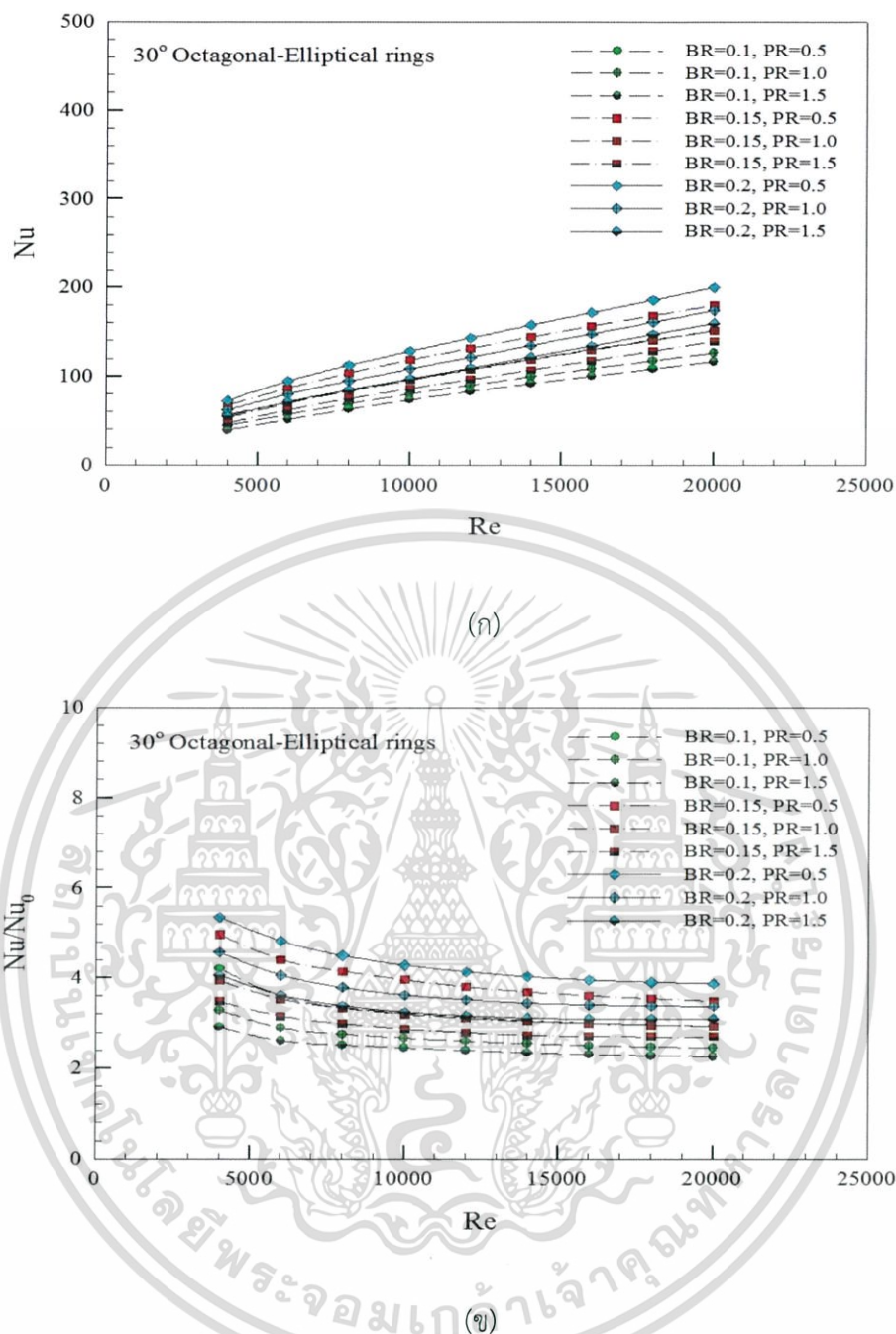


รูปที่ 6.17 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2

จากรูปที่ 6.17 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ $Re = 4,000$ เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 หรือแบบแปดเหลี่ยม-วงรีภายในท่อกลมสามารถช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากคอนทัวร์สีเขียวและสีฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 ทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อกับบริเวณผนังท่อได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีคอนทัวร์สีแดงปรากฏอยู่บริเวณกึ่งกลางผิวท่อทั้งบนและล่าง แสดงให้เห็นว่าบริเวณกึ่งกลางผิวท่อทั้งบนและล่างยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อยจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

6.2.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลล์ท์ (Nu) และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ (Nu/Nu_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี) ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2$, $PR = 0.5, 1.0, 2.0$ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.18



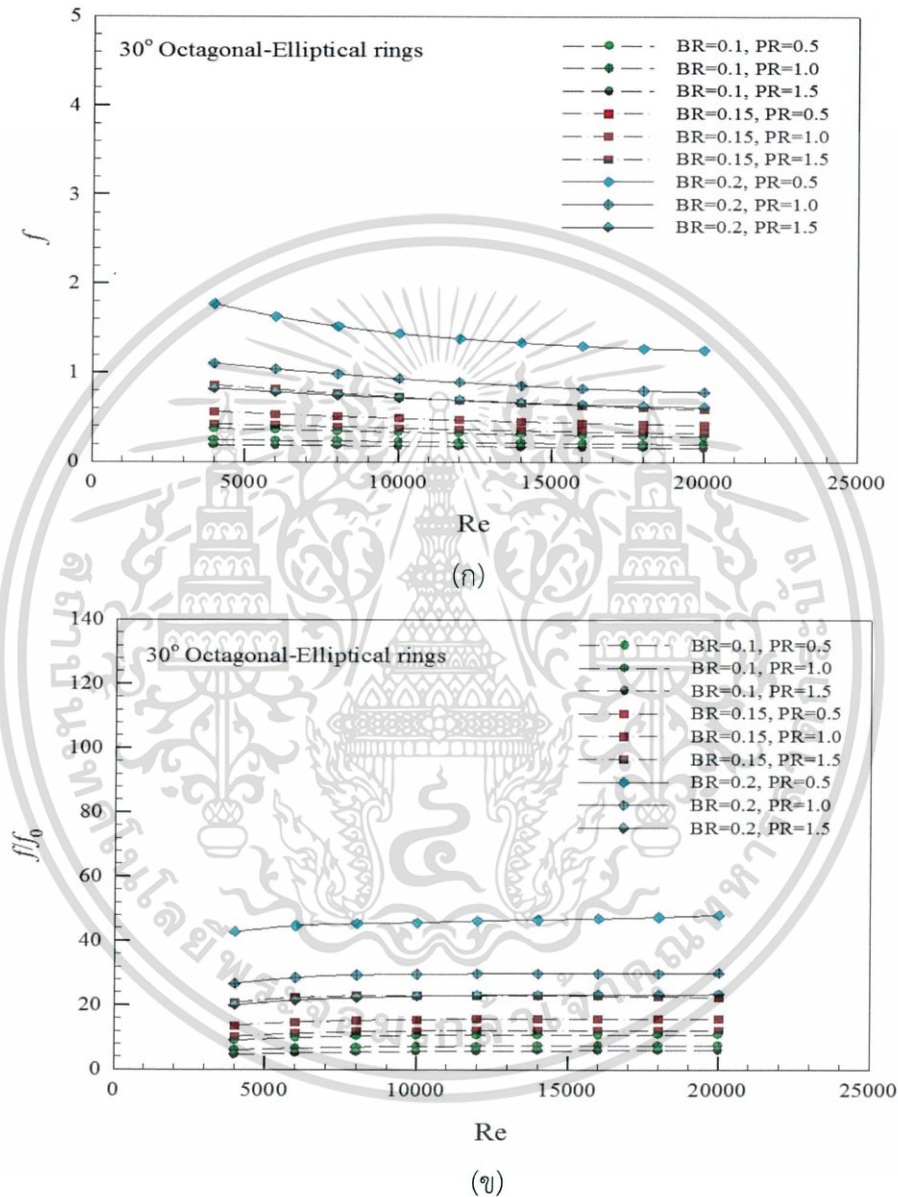
รูปที่ 6.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2
(ก) ค่าเลขนัสเซลท์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 72.45-199.26 ที่ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 5.35-3.87 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2$, $PR = 0.5, 1.0, 2.0$ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2

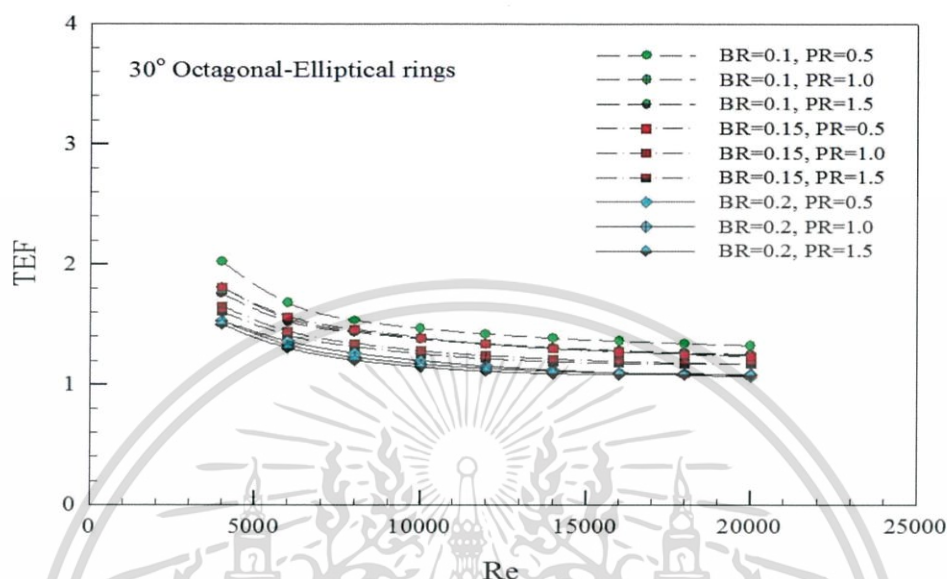
(ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.18-0.15 ที่ $Re = 4,000$ - $20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 4.57-6.00 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ $Re = 4,000$ - $20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีทรงแปดเหลี่ยม-วงรีเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.6 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่ BR = 0.1, 0.15, 0.2 , PR = 0.5, 1.0, 2.0 และช่วงของเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2

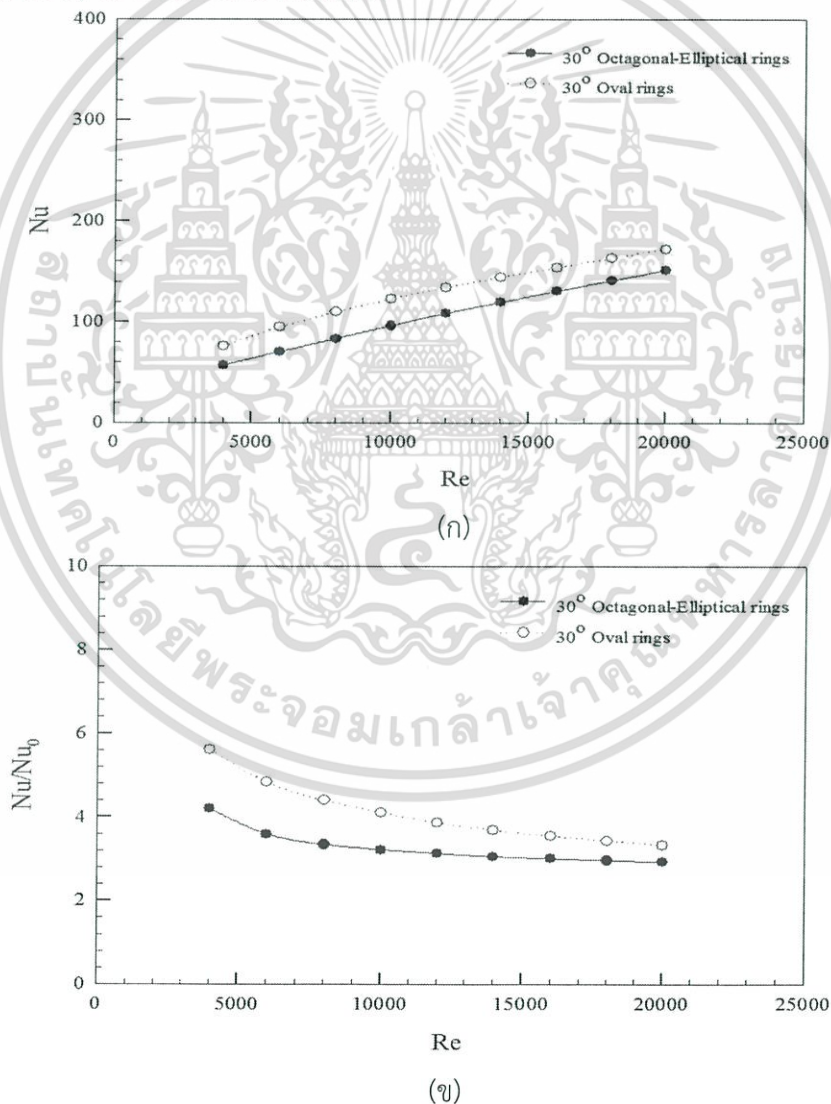
เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 2.02-1.32 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2

จากการแบบปรับปรุงที่ 2 โดยการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีที่ขอบด้านในวงแหวนให้เป็นทรงโค้งมนเหมือนแบบดั้งเดิม ทำให้ลดพื้นที่ของวงแหวนรูปตัววีที่ขวางการไหลให้มีขนาดเล็กลงได้ ส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนดีกว่าการใช้เพียงแบบปรับปรุงที่ 1 โดยค่าที่ได้มากกว่าค่าจากวงแหวนรูปตัววีที่มีค่ามากที่สุดจากวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 จึงเกิดแนวคิดต่อมาคือ หากทำการทดลองเพิ่มเติมโดยลดพื้นที่วงแหวนรูปตัววีที่ขวางการไหลบริเวณขอบด้านบนและด้านล่างลง เนื่องจากการสร้างวงแหวนลักษณะนี้สามารถลดพื้นที่ขวางการไหลของของไหลที่บริเวณด้านบนและด้านล่างได้ และคาดหวังว่าการลดพื้นที่วงแหวนนี้จะสามารถลดพื้นที่ขวางการไหลลง และช่วยให้ค่าความดันตกคร่อมลดลงและส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

6.3 วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่)

6.3.1 รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่)

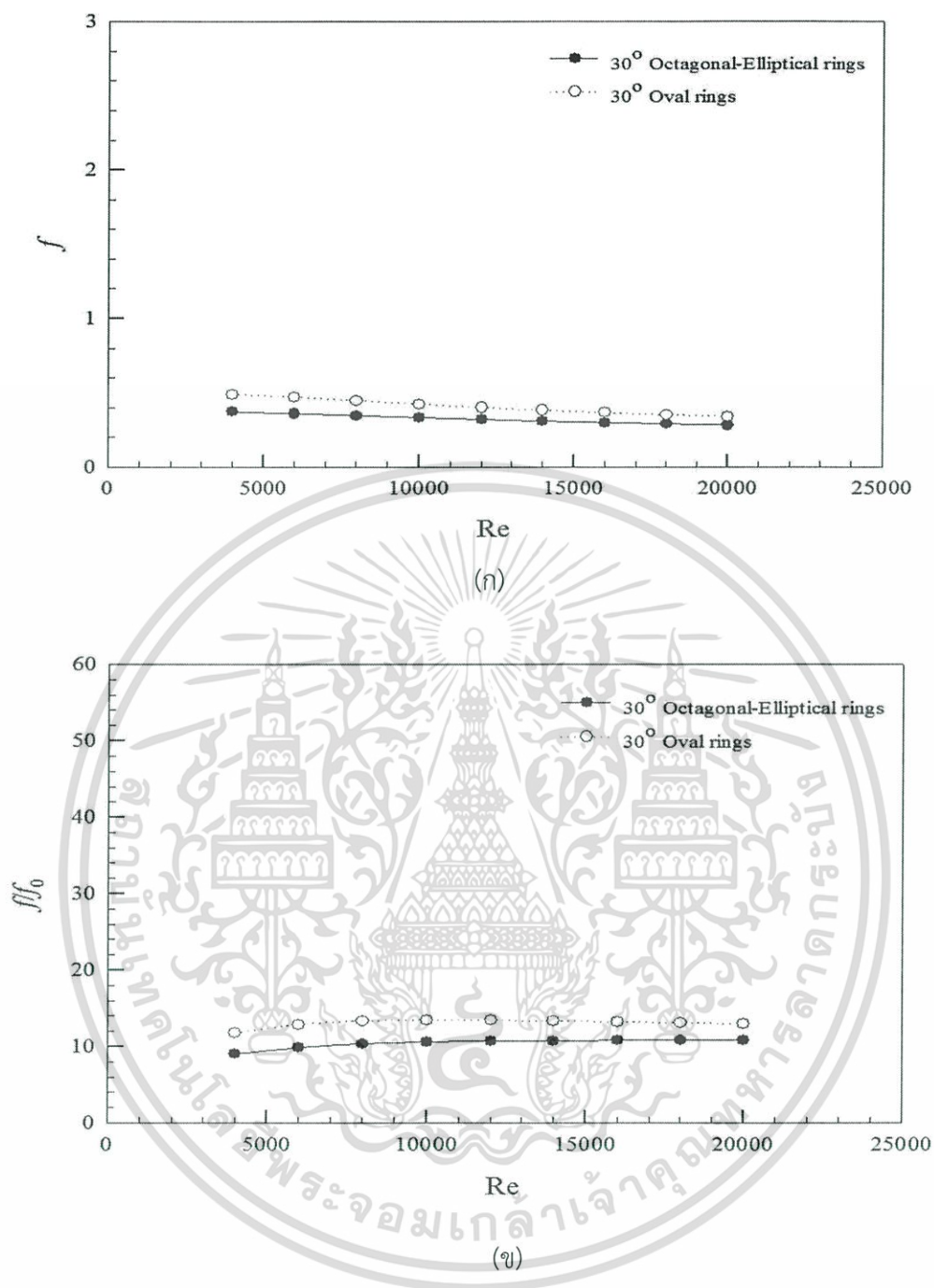
จากการศึกษาการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 ที่ผ่านมา จึงทำให้ทราบว่า การสร้างวงแหวนที่มีรูปโค้งมน สามารถช่วยให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลงและช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้มากขึ้นได้ แต่เนื่องจากการทำวงแหวนรูปตัววีเป็นรูปหลายเหลี่ยมนั้นไม่สามารถช่วยให้บริเวณผิวที่ถ่ายเทความร้อนได้ดีเท่าที่ควร จึงเป็นที่มาของการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 3 (วงรีรูปไข่) เนื่องจากบริเวณรอบนอกวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 สามารถถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวที่ได้ดีกว่าและมากกว่าแบบปรับปรุงที่ 1 และ 2 เนื่องจากวงแหวนมีพื้นที่ใกล้ผิวที่มากขึ้น จึงได้ทำการศึกษาวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 ที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2$, $PR = 0.5, 1.0, 1.5$ และ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ โดยค่าเลขนัยสเซลท์และค่าอัตราส่วนเลขนัยสเซลท์ ค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จะถูกนำเสนอรูปที่ 6.21, 6.22 และ 6.23 ตามลำดับ



รูปที่ 6.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (ก) ค่าเลขนัยสเซลท์

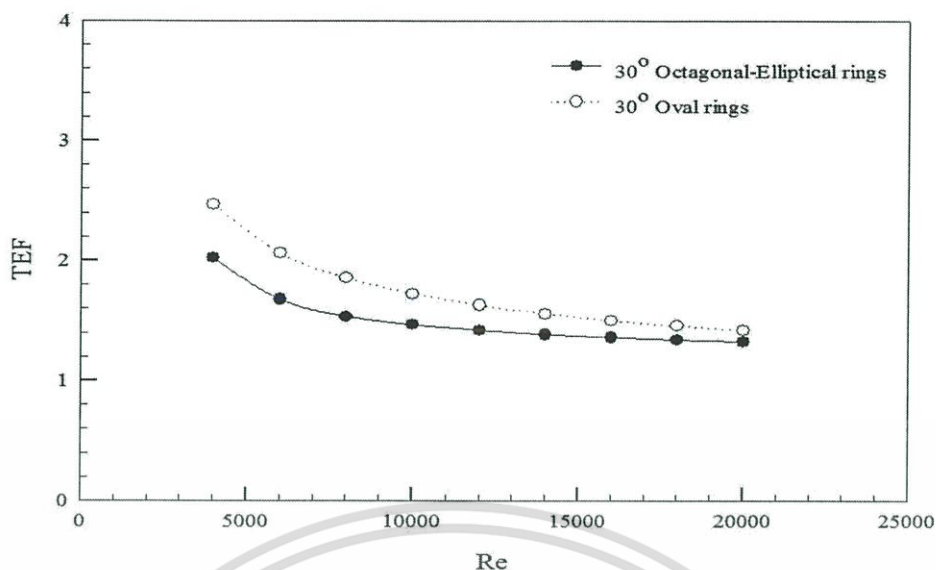
(ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัยสเซลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



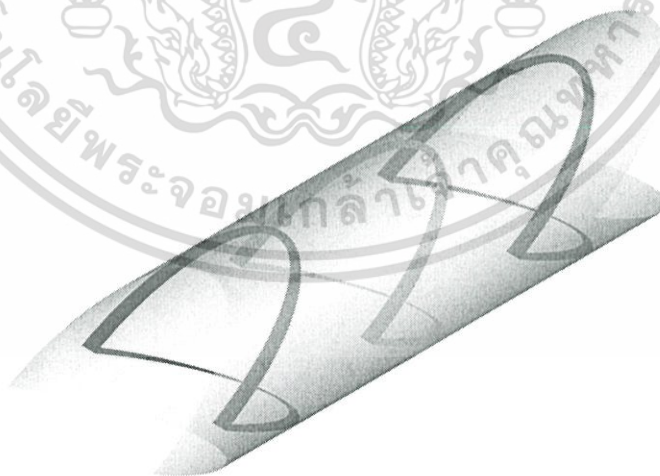
รูปที่ 6.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.23 สมรรถนะเชิงความร้อนของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 เทียบกับแบบปรับปรุงที่ 2

จากผลการเปรียบเทียบข้างต้นพบว่าวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด อันเนื่องมาจากสามารถสร้างการไหลที่ปั่นป่วนซึ่งช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน อีกทั้งยังลดค่าตัวประกอบเสียดทานได้มากกว่าแบบปรับปรุง 1 และส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าที่มากที่สุด โดยแสดงตัวอย่างของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 ภายในท่อกลมแสดงดังรูปที่ 6.24

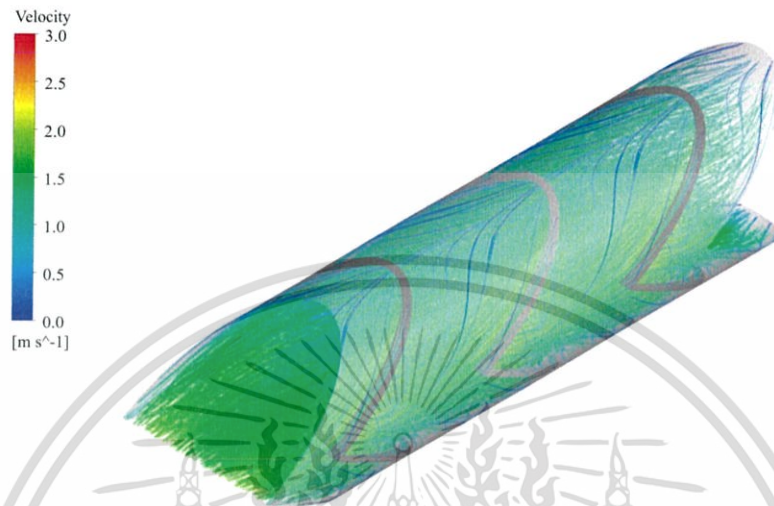


รูปที่ 6.24 ท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

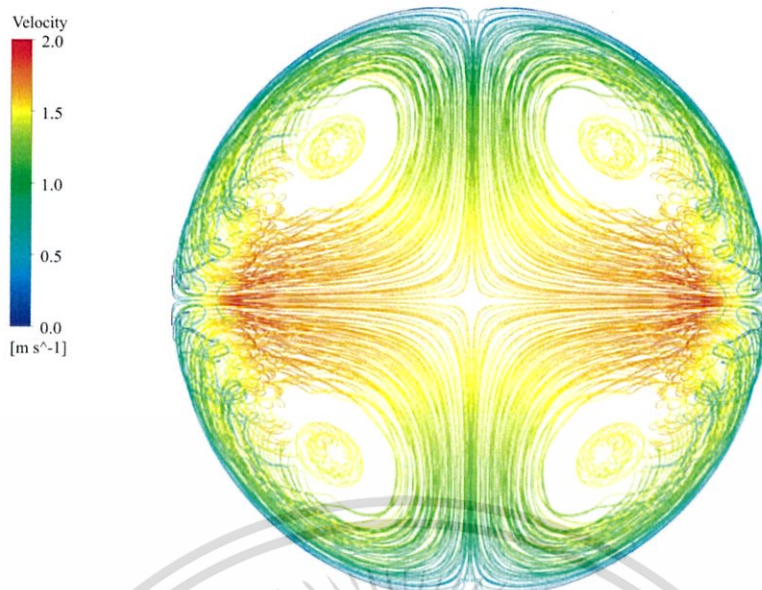
6.3.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่)

เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบปรับปรุงที่ 3 จะแสดงในรูปแบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลภายในท่อกลมผิวเรียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.25 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่)

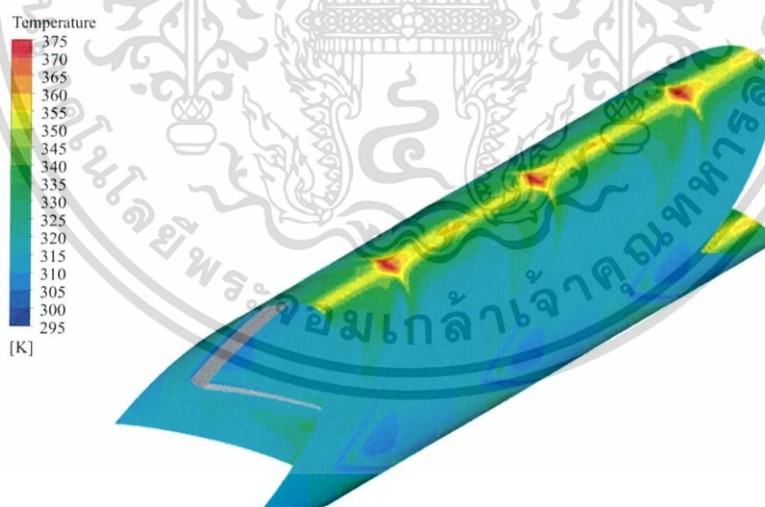
ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 ภายในท่อกลม สามารถทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น สังเกตได้จากลักษณะการไหลเกิดการหมุนวนที่ด้านทางเข้าของวงแหวนรูปตัววีปรับปรุงที่ 3 มีมากกว่าแบบดั้งเดิม หากมองภาพในแนวระนาบจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นว่ามีกระแสการไหลหมุนวน 2 คู่ ที่ช่วยเหนี่ยวนำกระแสการไหลให้รุนแรงและกระแทกเข้ากับผิวท่อกลมดังแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 6.26



รูปที่ 6.26 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แสงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่)

6.3.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แสงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่)

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แสงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 หรือการสร้างทรงวงรีรูปไข่ที่อยู่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 6.27



รูปที่ 6.27 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แสงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่)

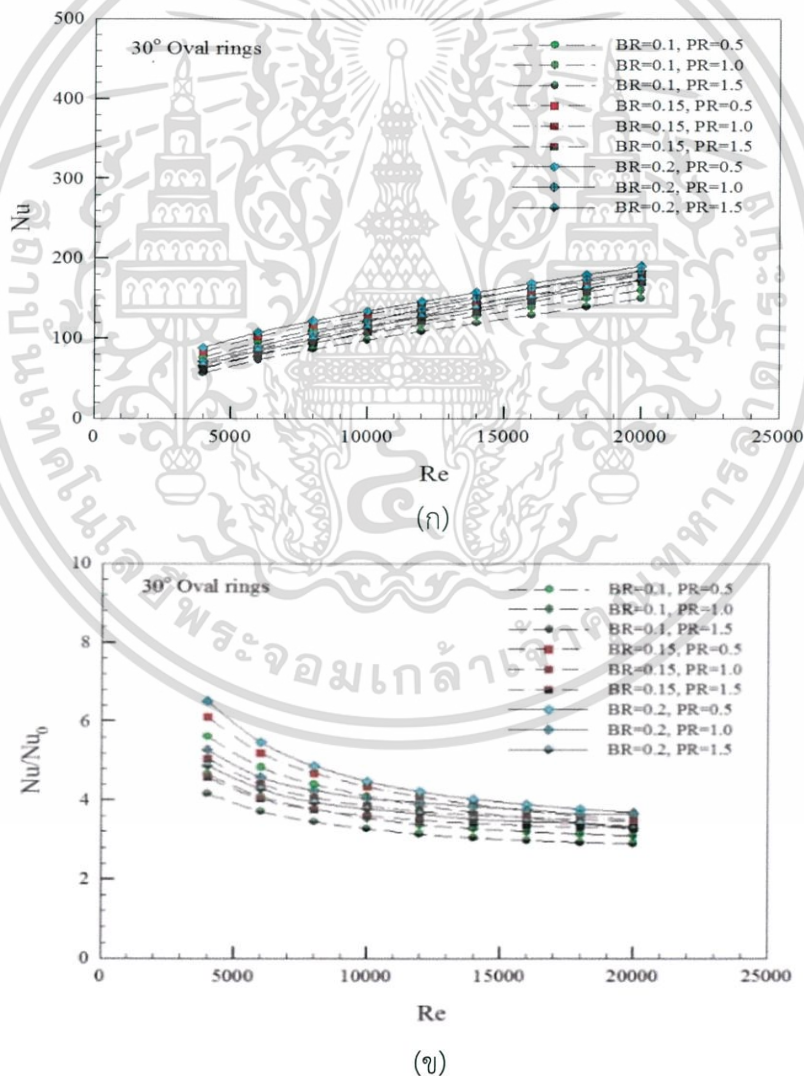
จากรูปที่ 6.27 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แสงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ $Re = 4,000$ เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 หรือทรงวงรีรูปไข่ภายในท่อกลม สามารถช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากคอนทราสต์เชิงขั้วและสีฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 ทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนเป็นผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกับความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูง และบริเวณที่เกิดความปั่นป่วนหรือการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิที่บริเวณผนังที่น้อยที่สุดคือบริเวณกึ่งกลางท่อด้านบนและล่างของแหวนทรงกรวยซึ่งเห็นได้จากคอนทราสต์แดงยาวตลอดแนวการไหล แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่กึ่งกลางของท่อด้านบนและล่างยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อย จึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

6.3.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลท์เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลท์ (Nu) และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งถูกพิจารณาที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2$ $PR = 0.5, 1.0, 1.5$ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.28



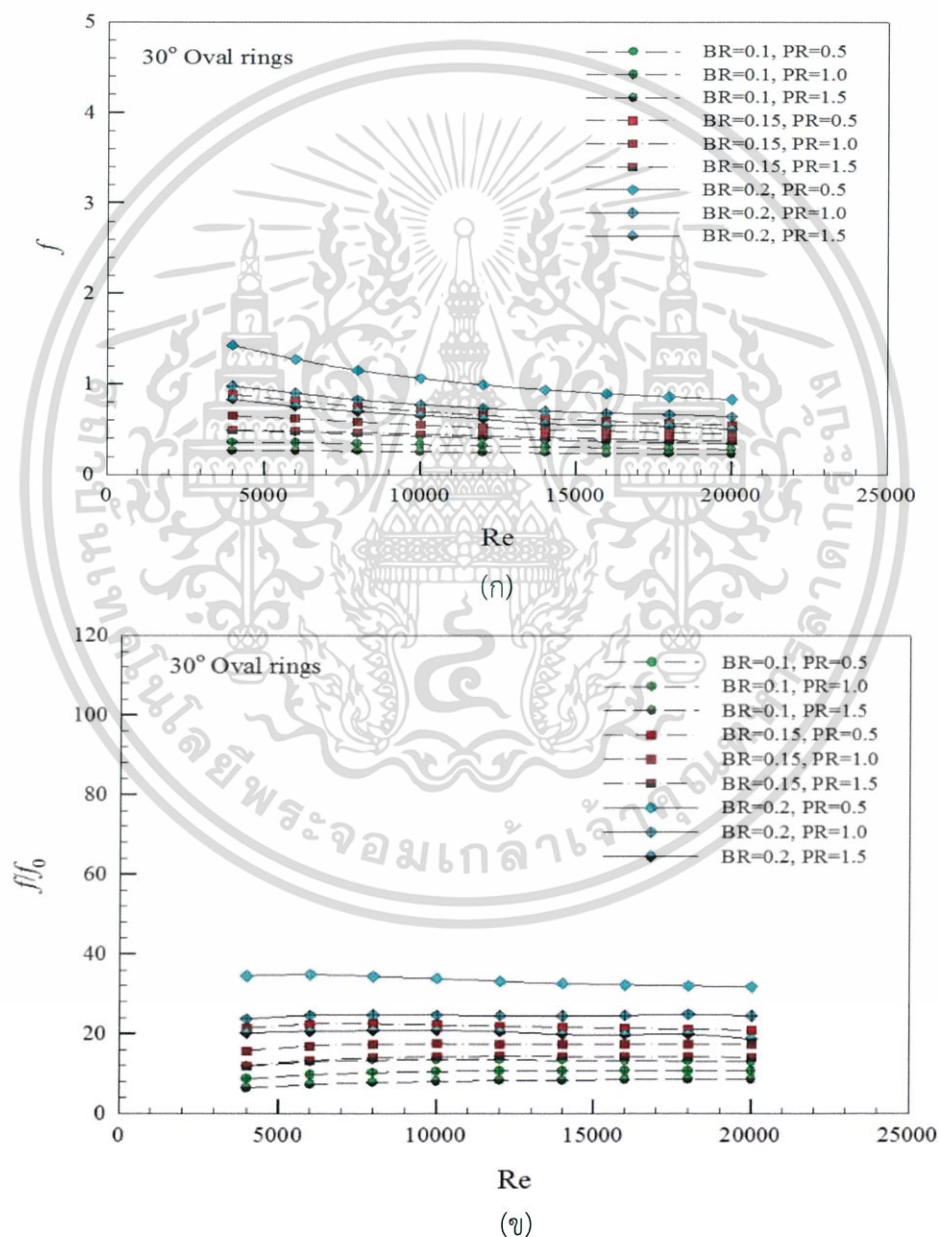
รูปที่ 6.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่) (ก) ค่าเลขนัสเซลท์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนีสเซลล์ท์สูงสุดอยู่ในช่วง 88.21-190.41 ที่ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (ทรงวงรีรูปไข่) และอัตราส่วนเลขนีสเซลล์ท์สูงสุดอยู่ในช่วง 6.51-3.69 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 เช่นเดียวกัน

6.3.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงที่ 3 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2, PR = 0.5, 1.0, 1.5$ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.29



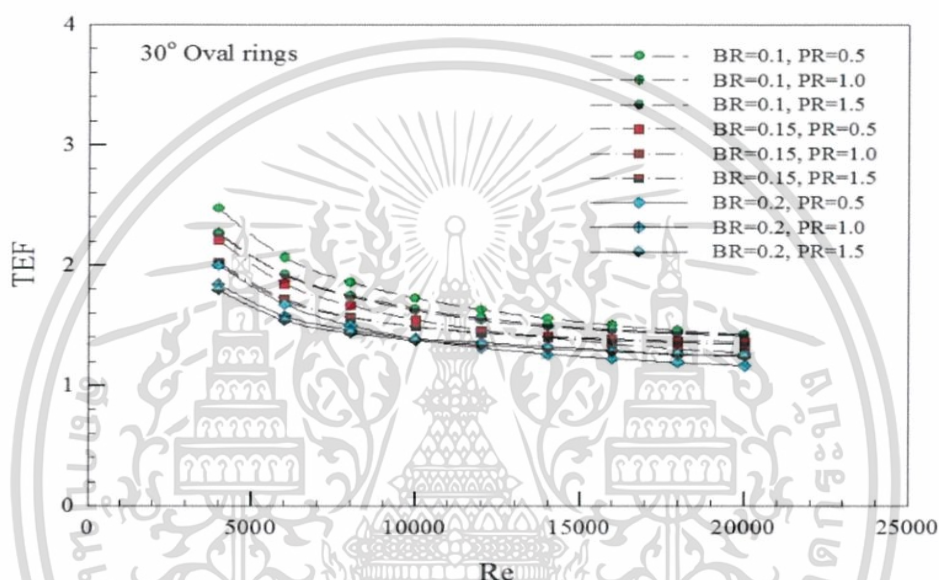
รูปที่ 6.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.26-0.22 ที่ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 6.35-8.54 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 เช่นเดียวกัน

6.3.6 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2$, $PR = 0.5, 1.0, 1.5$ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.30



รูปที่ 6.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3

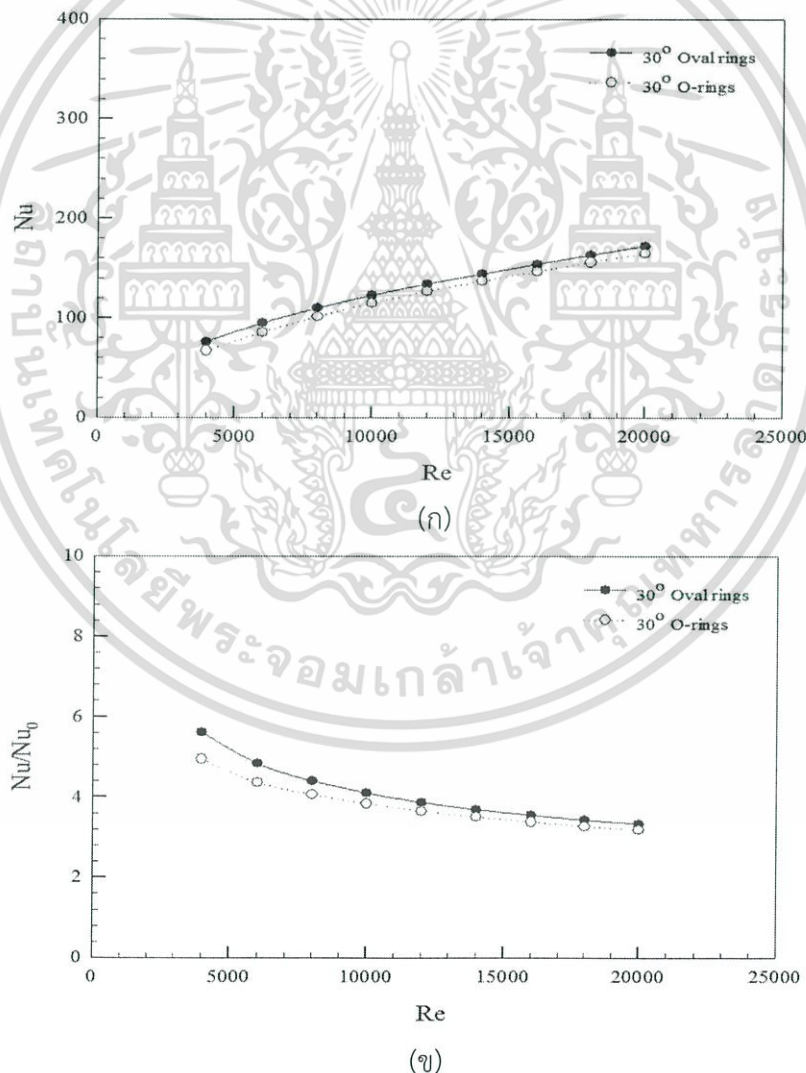
เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดในช่วง 2.47-1.42 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3

จากการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 การสร้างวงแหวนที่มีรูปโค้งมน สามารถช่วยให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลงและช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้มากขึ้นได้ ทำให้ลดพื้นที่ของวงแหวนที่ขวางการไหลให้มีขนาดเล็กลงได้มากกว่าแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงที่ 1 และ 2 ส่งผลให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลง และเมื่อเทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 2 (ทรงแปดเหลี่ยม-วงรี) แล้วนั้น วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 ให้ผลสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีกว่าแบบที่ 2 จึงสรุปได้ว่า การสร้างวงแหวนที่มีรูปโค้งมน สามารถช่วยให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลงและช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้มากขึ้นได้ และยังสามารถระบุได้ชัดเจนว่าหากทำวงแหวนรูปตัววีให้มีพื้นที่ทั้งด้านบนและด้านล่างให้มีขนาดลดลงแล้วจะให้ผลที่ดีที่สุด ดังนั้นการลดพื้นที่ที่ตัววงแหวนรูปตัววีที่ด้านข้างและด้านบน-ล่าง อาจจะทำให้ผลที่ดีกว่า เนื่องจากการลดพื้นที่ขวางการไหลทั้งด้านข้างและด้านบน-ล่าง ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

6.4 วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring)

6.4.1 รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring)

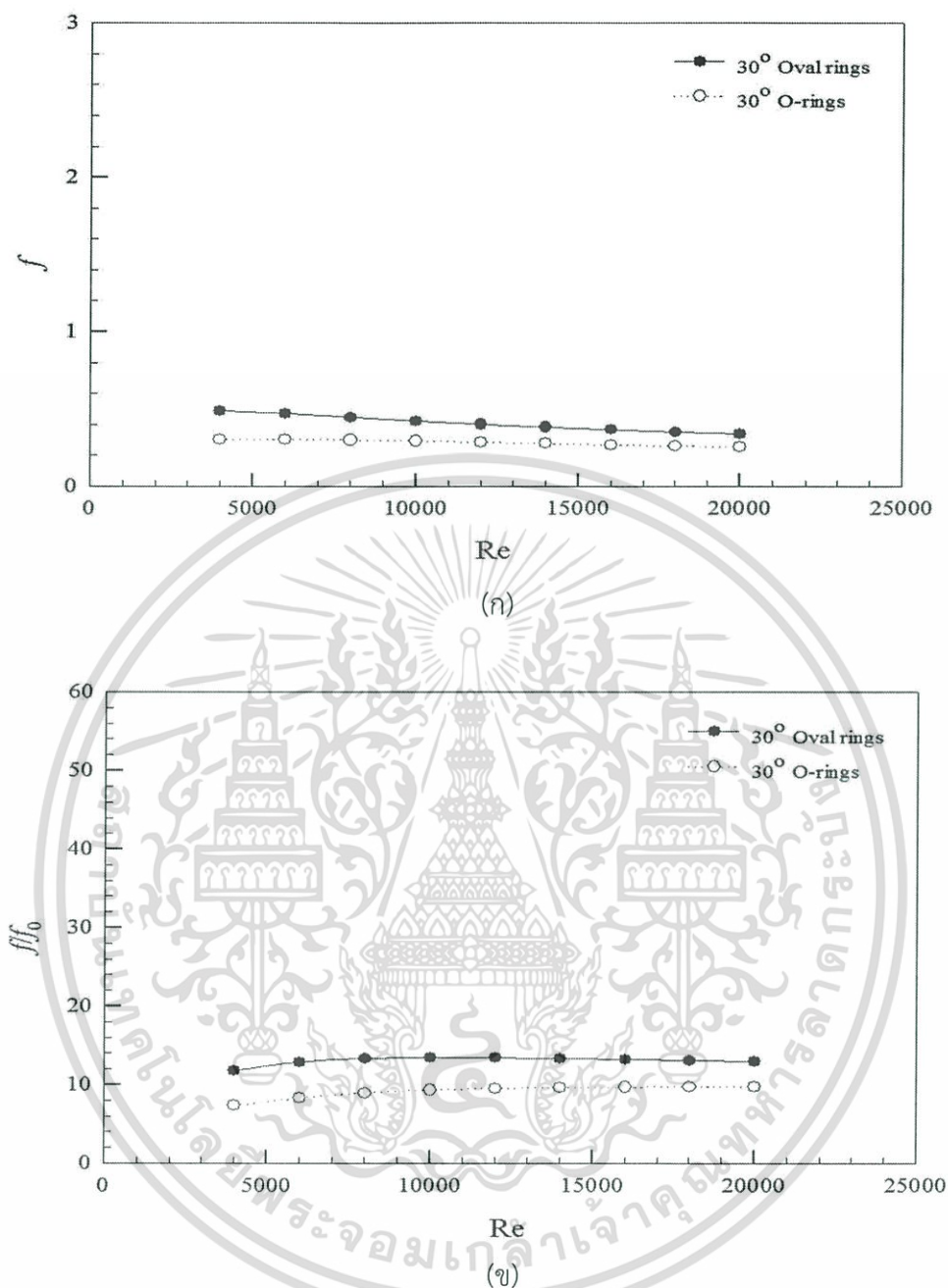
จากการศึกษาการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 ที่ผ่านมา จึงทำให้ทราบว่า การสร้างวงแหวนที่มีรูปโค้งมน สามารถช่วยให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลงและช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้มากขึ้นได้ และยังช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่มากขึ้นที่บริเวณผิวท่ออีกด้วย แต่เนื่องจากการทำวงแหวนรูปตัววีเป็นรูปทรงโอวัล สามารถลดพื้นที่การขวางการไหลได้อีก จึงเป็นที่มาของการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 4 (O-ring) เนื่องจากบริเวณรอบนอกวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 สามารถถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวท่อได้ดีกว่าและมากกว่าแบบปรับปรุงที่ 1 และ 2 เราจึงคงลักษณะของวงแหวนรูปตัววีบริเวณขอบวงแหวนไว้ จึงได้ทำการศึกษาวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2$, $PR = 0.5, 1.0, 1.5$ และ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ โดยค่าเลขนี้สเซลท์และค่าอัตราส่วนเลขนี้สเซลท์ ค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จะถูกนำเสนอรูปที่ 6.31, 6.32 และ 6.33 ตามลำดับ



รูปที่ 6.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 (ก) ค่าเลขนี้สเซลท์

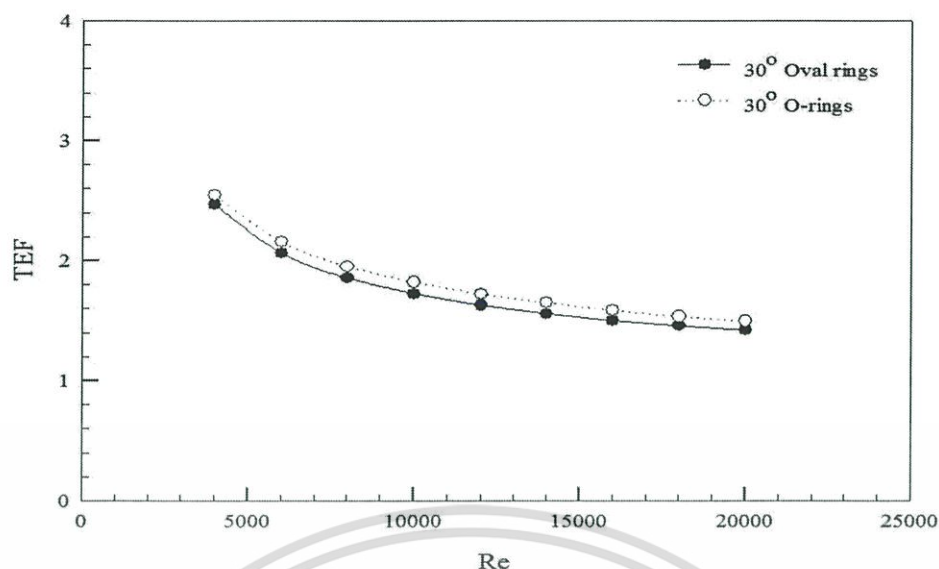
(ข) ค่าอัตราส่วนเลขนี้สเซลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามในตราประทับการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุง ที่ 4 เทียบกับวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 3 เทียบกับ
(ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.33 สมรรถนะเชิงความร้อนของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เทียบกับแบบปรับปรุงที่ 3

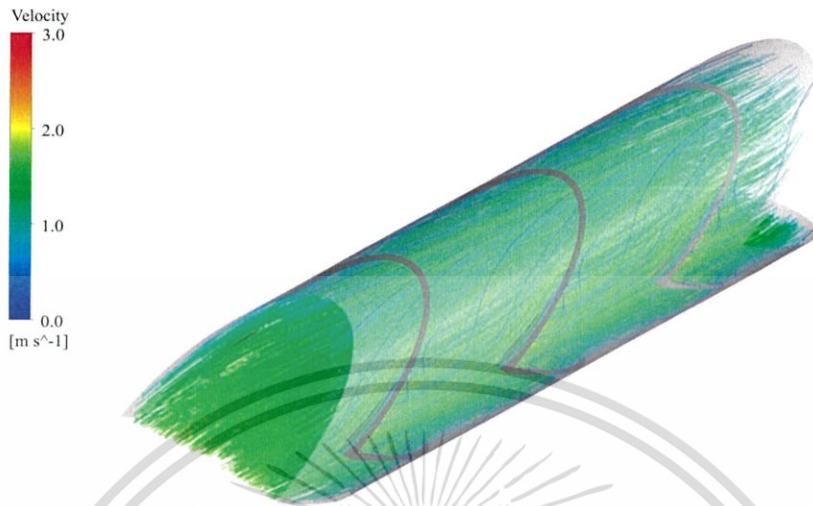
จากการศึกษาวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ผ่านมาทั้ง 3 รูปแบบ ทำให้ทราบว่า การปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (โอริง) นั้นจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดทั้งจากแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงที่ 1, 2 และ 3 โดยขึ้นอยู่กับรูปแบบของวงแหวนรูปตัววีนั้นๆ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีเพิ่มเติม โดยการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีให้มีรูปทรงที่เหมาะสมมากขึ้น ซึ่งคาดหวังว่าการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 4 จะช่วยลดค่าความดันตกคร่อมได้มากขึ้น ตัวอย่างลักษณะการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 4 แสดงไว้ดังรูปที่ 6.34-6.35



รูปที่ 6.34 ท่อกลมที่ใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring)

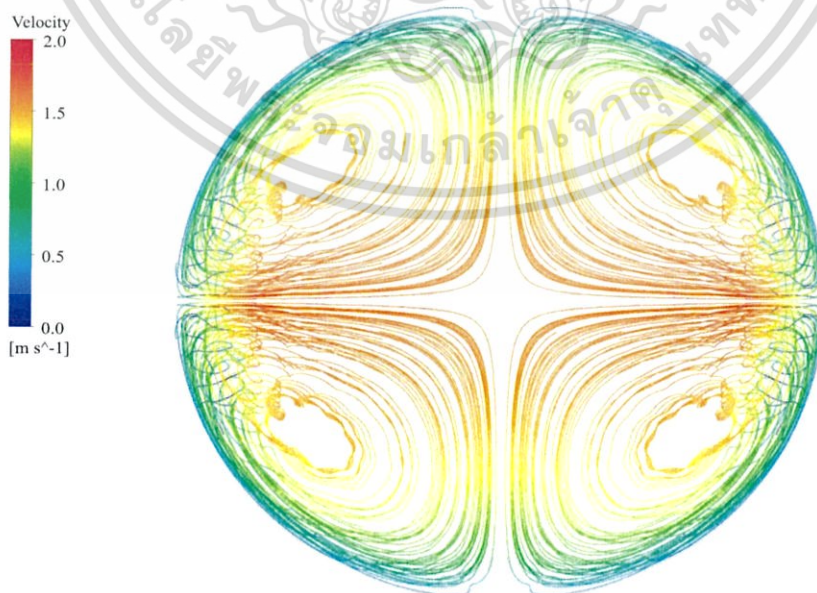
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring) เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ ที่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.35-6.36 ตามลำดับ



รูปที่ 6.35 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring)

รูปที่ 6.36 แสดงเส้นกระแสการไหลในแนวระนาบที่ $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ $Re = 4,000$ เห็นได้ชัดว่าเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ทำให้เกิดกระแสการไหลหมุนวน 2 คู่ ที่ช่วยเหนี่ยวนำกระแสการไหลให้รุนแรงและกระแทกเข้ากับผิวท่อกลม ซึ่งช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหล เกิดการไหลหมุนวนมากขึ้นเมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิม



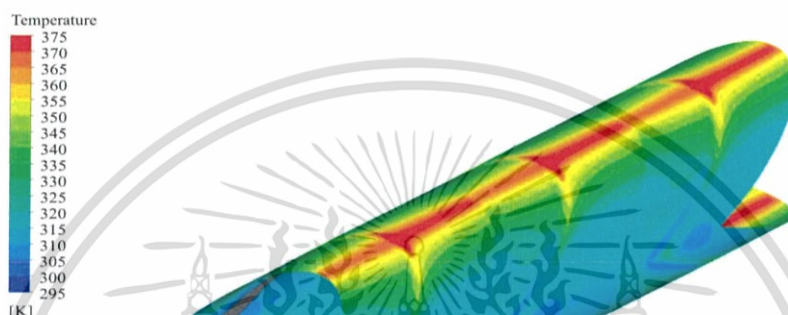
รูปที่ 6.36 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบกับ การใส่วงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม พบว่าการใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ พบว่าวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ทำให้เกิดการไหลหมุนวนมากที่สุดกว่าวงแหวนรูปตัววีแบบอื่นๆ ซึ่งการไหลหมุนวนนี้เองที่เกิดจากการทำมุมปะทะที่ทางเข้า ซึ่งช่วยเหนี่ยวนำกระแสการไหลให้รุนแรงขึ้นจนนำไปสู่การถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นของระบบ

6.4.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่วงแหวนแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring)

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 หรือทรง O-ring ที่ติดตั้งภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิจะแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 6.37

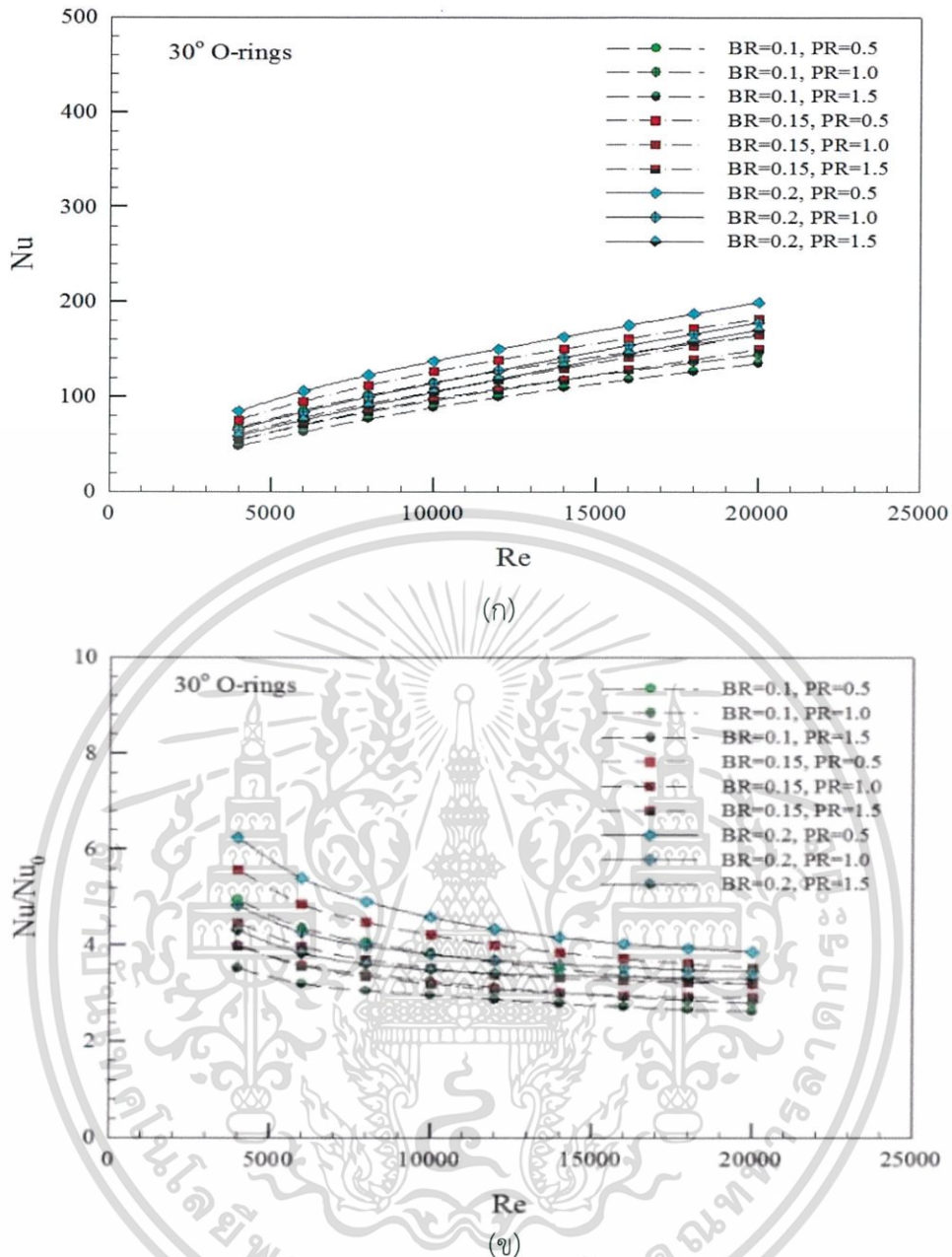


รูปที่ 6.37 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring)

จากรูปที่ 6.38 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ $BR = 0.1$, $PR = 1.0$ และ $Re = 4,000$ เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมียมากขึ้นบริเวณด้านข้างของผิวท่อหรือมีการกระจายอุณหภูมิมากกว่าวงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิม สังเกตได้จากคอนทัวร์สีเขียวและสีฟ้าที่เกิดขึ้น และเห็นได้จากคอนทัวร์สีแดงของผิวท่อที่เพิ่มมากขึ้น แต่ก็แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เกิดคอนทัวร์สีแดงยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลที่น้อยเกินไป จึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิบริเวณด้านบน-ล่างของผิวท่อน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

6.4.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลล์ต์ (Nu) และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ (Nu/Nu_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เมื่อใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาที่ระยะ $BR = 0.1, 0.15, 0.2$, $PR = 0.5, 1.0, 1.5$ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000-20,000$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.38



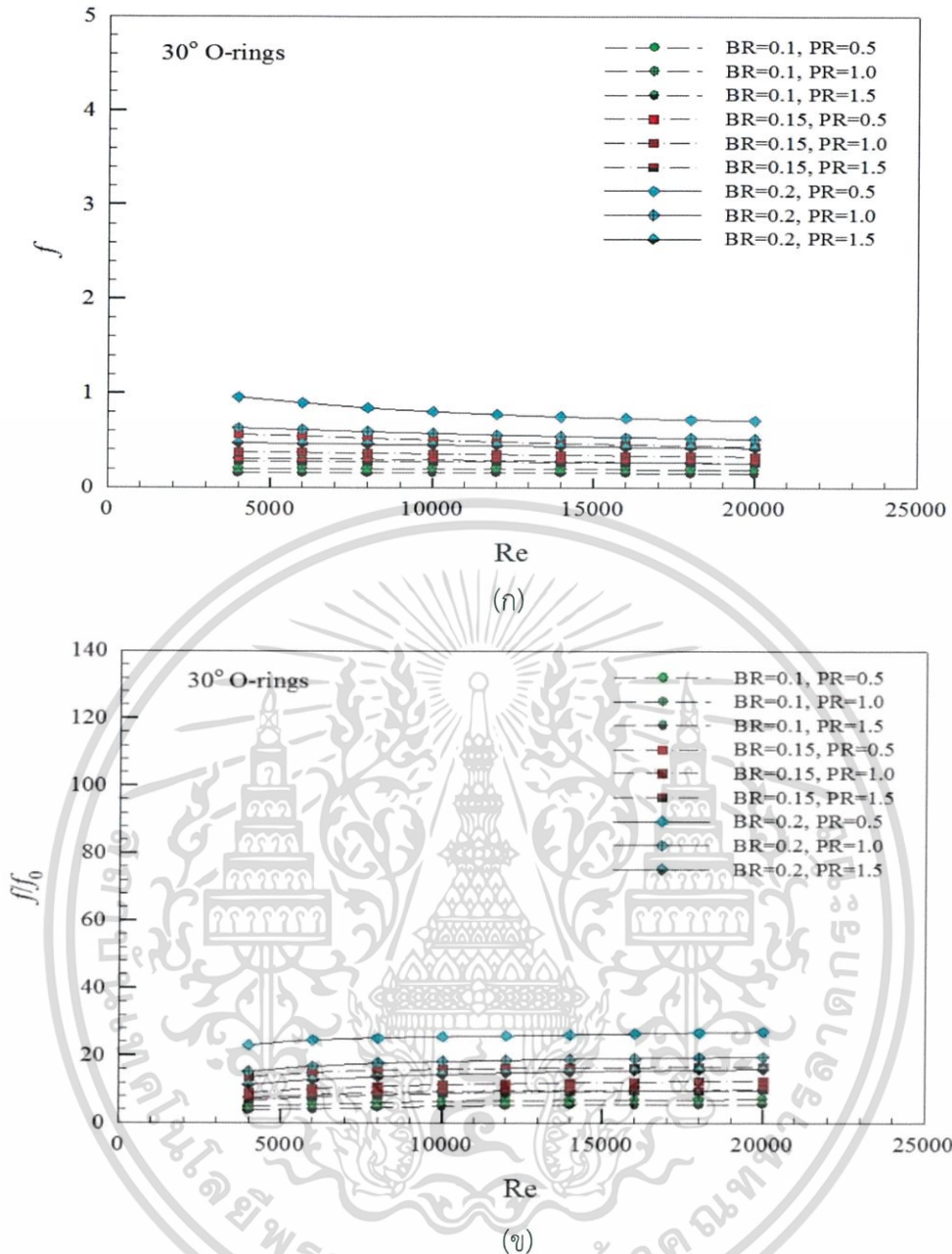
รูปที่ 6.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (ก) ค่าเลขนัสเซลท์ (ข) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 84.21-199.51 และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 6.25-3.86 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2$, $PR = 0.5, 1.0, 1.5$ ในช่วงของ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เช่นเดียวกัน

6.4.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) เมื่อใส่วงแหวนแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring) ที่สภาวะ $BR = 0.1, 0.15, 0.2$, $PR = 0.5, 1.0, 1.5$ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



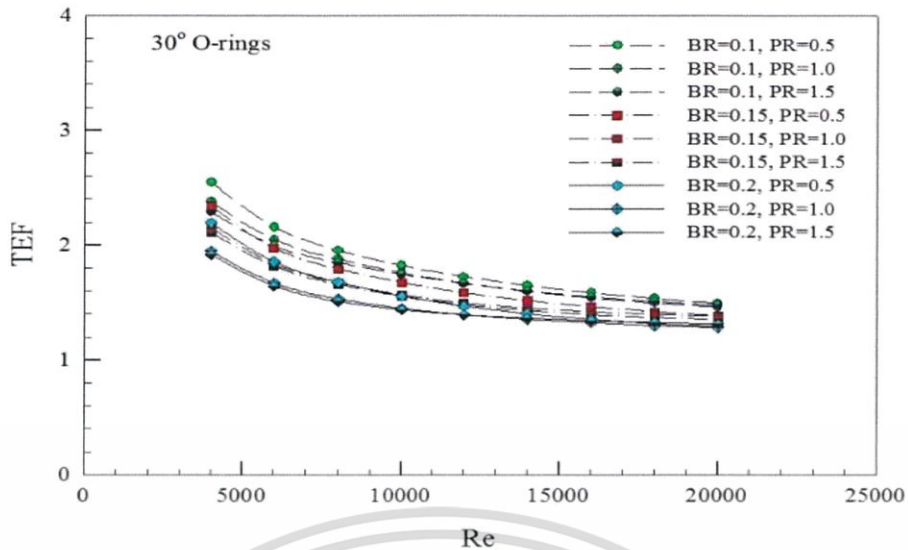
รูปที่ 6.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (ก) ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข) ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.15-0.14 และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.65-5.61 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2, PR = 0.5, 1.0, 1.5$ ตามลำดับ ในช่วงของ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เช่นเดียวกัน

6.4.6 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (O-ring)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2, PR = 0.5, 1.0, 1.5$ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.40

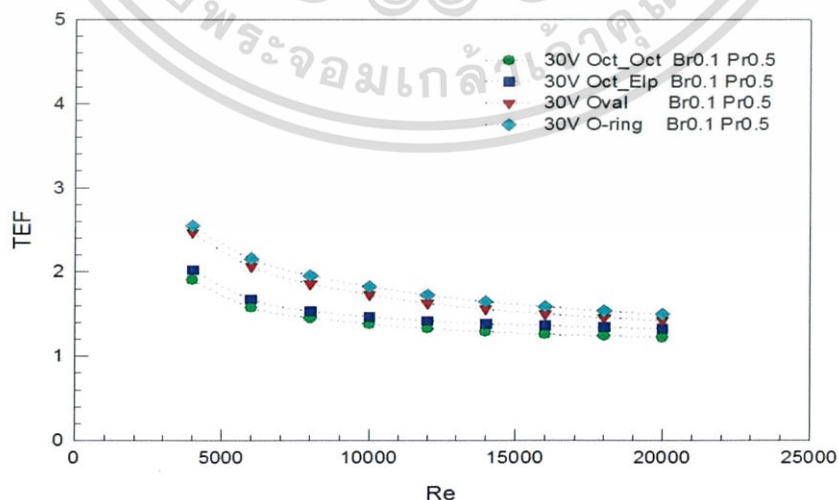
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4

จากกราฟพบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 2.55-1.49 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ $Re = 4,000$ ถึง 20,000 สำหรับวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4

จากการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบที่ 4 ที่ $BR = 0.1, 0.15, 0.2$, $PR = 0.5, 1.0, 1.5$ ตามลำดับ เห็นได้ว่าสามารถลดพื้นที่ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงต่างๆ ที่ขวางการไหลให้มีขนาดเล็กลงได้มากกว่าแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงที่ 1, 2 และ 3 ส่งผลให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลง และเมื่อนำค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดของแบบปรับปรุงที่ 4 (โอริง) เปรียบเทียบกับแบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม) แบบปรับปรุงรูปแบบที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี) และแบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่) ดังรูป 6.41 พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 (โอริง) ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงกว่าแบบปรับปรุงอื่นๆ ดังนั้นผู้วิจัยจะยึดรูปวงแหวนแบบปรับปรุงที่ 4 เป็นรูปแบบหลักในการวิจัยถึงตัวแปรอื่นๆ ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป



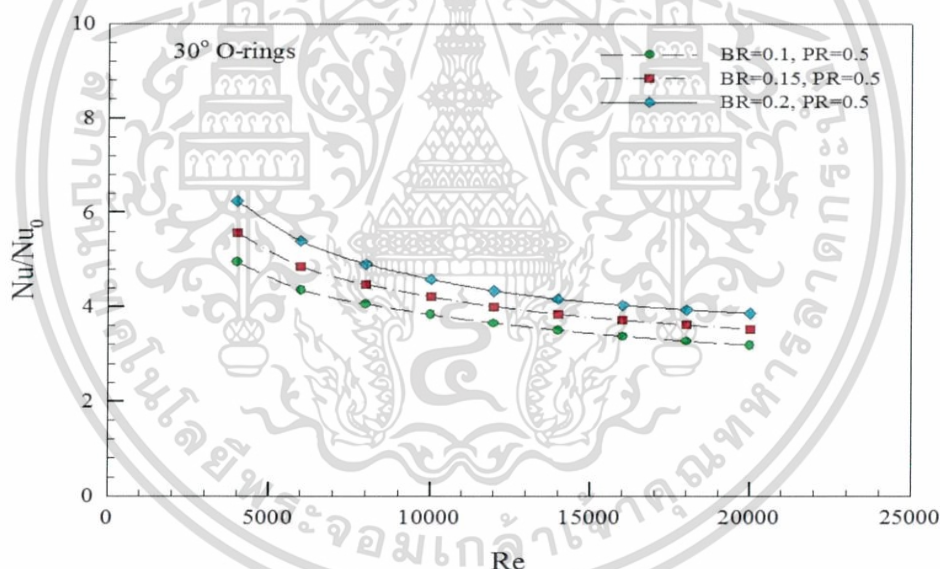
รูปที่ 6.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 1, 2, 3 และ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 อิทธิพลจากอัตราส่วนความสูงของวงแหวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบต่างๆ โดยการลดอัตราส่วนความสูงของวงแหวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (blockage ratio, BR) ซึ่งสามารถลดพื้นที่ขวางการไหลให้น้อยลงและยังช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานลงได้ แต่การลด BR นั้นจำเป็นที่จะต้องหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดให้ได้เสียก่อนจึงจะหาค่าตัวแปรอื่นๆ ต่อไป จึงได้ทำการทดลองลดค่า BR ของวงแหวนรูปตัววีที่มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดจากหัวข้อก่อนหน้านี้นี้ลงไปให้อัตราส่วน 0.1, 0.15 และ 0.2 ทั้งสิ้น 3 ขนาด โดยค่าเลขนัสเซลล์และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จะถูกนำเสนอรูปที่ 6.42, 6.43 และ 6.44 ตามลำดับ

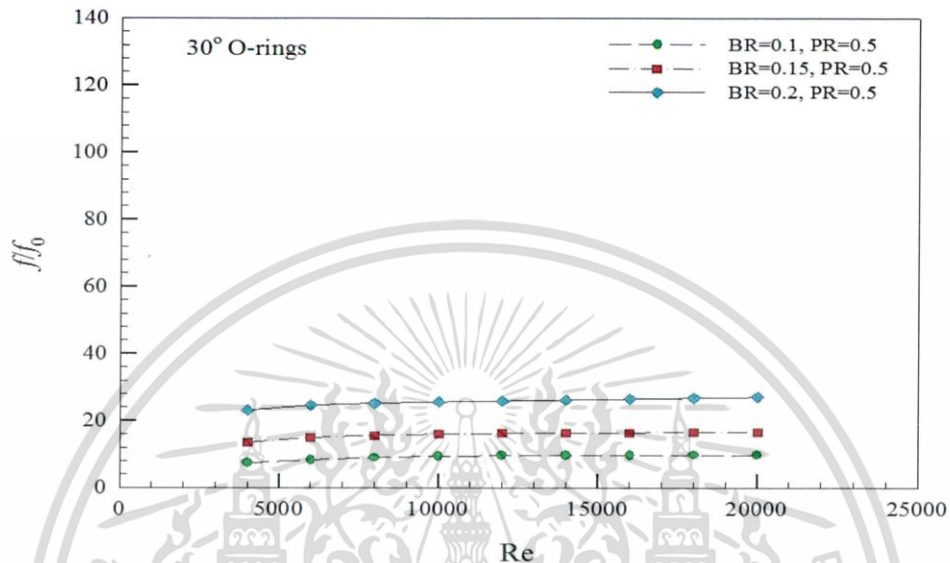
การลดอัตราส่วนความสูงของวงแหวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (blockage ratio, BR) ให้มีขนาดเล็กจะมีผลทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์รูปแบบของวงแหวนรูปตัววีที่ทำการปรับปรุงพบว่ารูปแบบวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีแบบอื่นๆ เนื่องจากยังมีปัจจัยของตัวแปรต่างๆ ที่คาดว่าจะมีผลต่อสมรรถนะเชิงความร้อนอยู่ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ต่อ โดยทำการศึกษาที่ BR = 0.1, 0.15 และ 0.2 ตามลำดับ



รูปที่ 6.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์เลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ BR ต่างๆ เทียบกับค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์

จากรูปที่ 6.42 แสดงให้เห็นกราฟค่าเลขนัสเซลล์และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ภายในท่อกลมที่ BR = 0.1, 0.15 และ 0.2 เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลล์สูงสุดอยู่ในช่วง 84.21-199.51 ที่ BR = 0.2 ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์สูงสุดอยู่ในช่วง 6.25-3.86 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ BR = 0.2 ในช่วงของ Re = 4,000-20,000 และผลของความสูงที่ให้ผลลัพธ์เรียงจากมากไปน้อยคือ BR = 0.2, 0.15 และ 0.1 ตามลำดับ

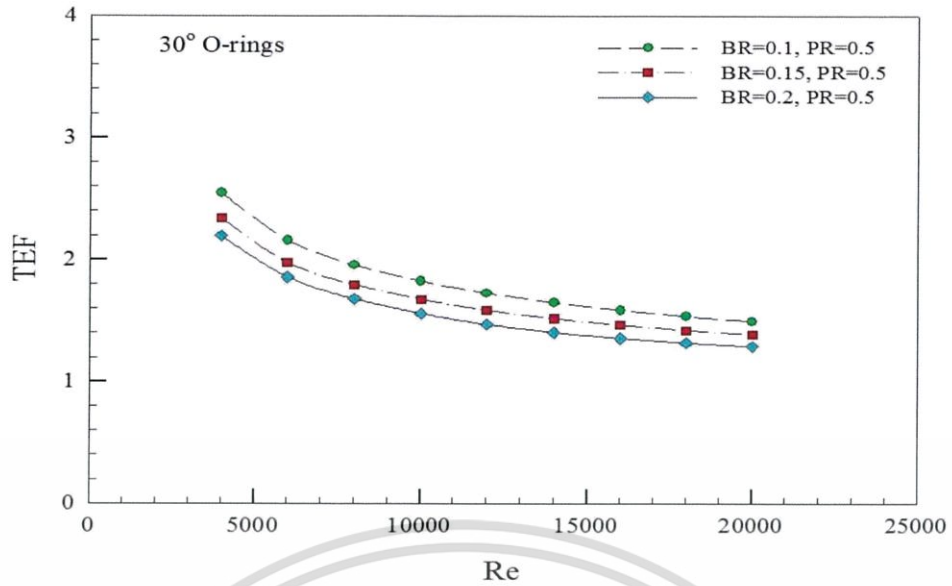
ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เมื่อใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความสูงของวงแหวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 ที่สภาวะตัวแปร $PR = 0.5$ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000-20,000$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.43



รูปที่ 6.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ BR เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 เทียบกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

จากรูปที่ 6.43 แสดงให้เห็นค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ภายในท่อกลมที่ BR เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 เมื่อวิเคราะห์ผลที่ได้พบว่า การลดค่า BR ทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลง โดยค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.15-0.14 ที่ $BR = 0.1$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.65-5.61 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ $BR = 0.1$ ในช่วงของ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เช่นเดียวกัน และผลของความสูงที่ให้ผลลัพธ์เรียงจากมากไปน้อยคือ $BR = 0.2, 0.15$ และ 0.1 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาจึงสามารถสรุปได้ว่าค่า BR มีผลกับค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์และค่าส่วนตัวประกอบเสียดทาน โดยเมื่อ BR ลดลง จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์และค่าอัตราส่วนประกอบเสียดทานลดต่ำลง แต่เมื่อ BR ลดลง จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์และค่าอัตราส่วนประกอบเสียดทานสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของ BR ที่ให้ผลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ดังรูปที่ 6.44 พบว่าที่ $BR = 0.1$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 นั้นให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดในช่วง 2.55-1.49 ที่ $Re = 4,000-20,000$ ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงที่สุดจากการค่าของ BR ทั้งหมด ดังนั้น ในการศึกษาถึงตัวแปรอื่นในหัวข้อถัดไปจะกำหนดอัตราส่วนความสูงอยู่ที่ $BR = 0.1$ ทุกกรณี และทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพิตซ์ PR ในหัวข้อต่อไป



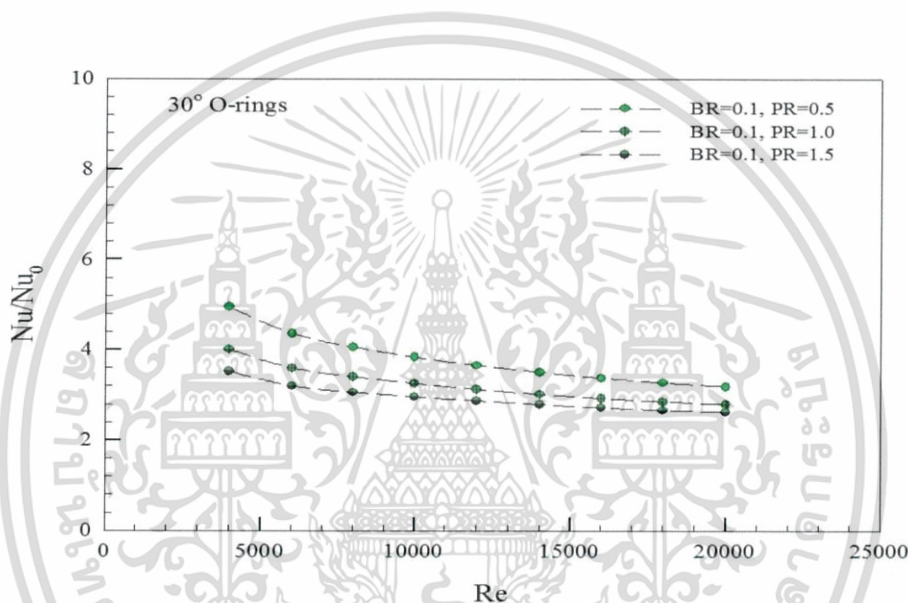
รูปที่ 6.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ $BR = 0.1, 0.15$ และ 0.2



6.6 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตซ์

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอิทธิพลอัตราส่วนความสูง (blockage ratio, BR) ให้ผลของสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดในการศึกษาที่ผ่านมา ดังนั้น ในหัวข้อต่อไปนี้จะทำการศึกษาดังกล่าวถึงอิทธิพลของอัตราส่วนพิตซ์ถึงผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพิตซ์ที่แตกต่างกันตั้งแต่ $PR = 0.5, 1.0$ และ 1.5 โดยทำการศึกษาที่ $BR = 0.1$

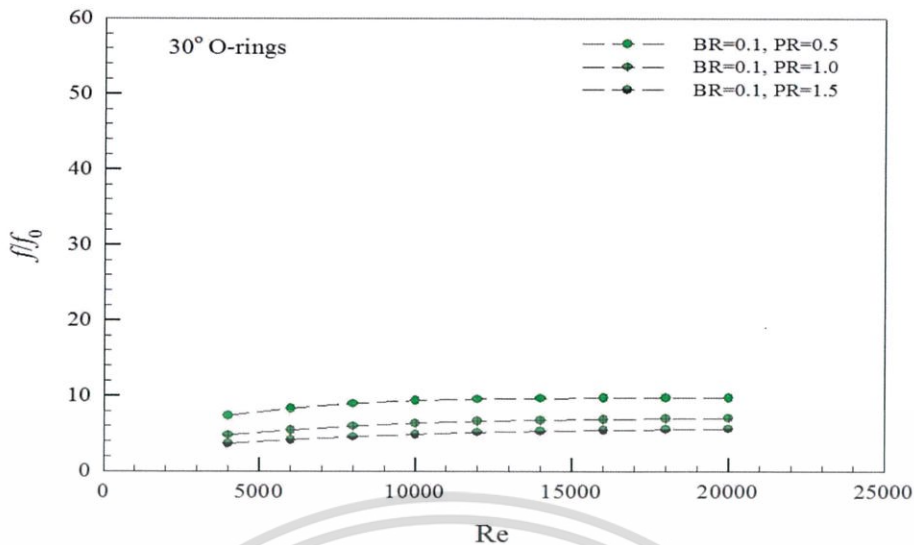
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลท์ (Nu) และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนพิตซ์ $PR = 0.5, 1.0$ และ 1.5 ที่สภาวะตัวแปร $BR = 0.1$ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000-20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 6.45



รูปที่ 6.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ $PR = 0.5, 1.0$ และ 1.5 เทียบกับค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์

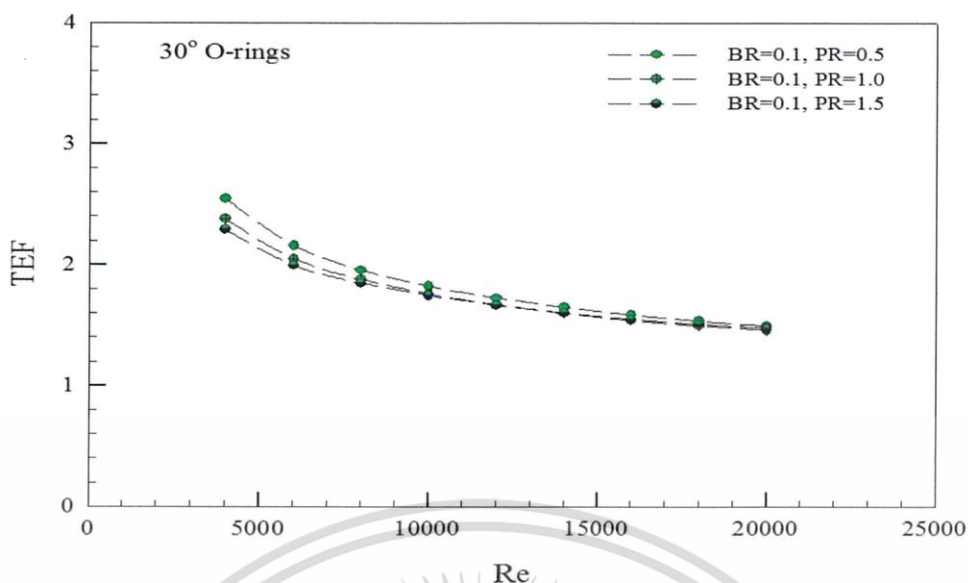
จากรูปที่ 6.45 แสดงให้เห็นกราฟค่าเลขนัสเซลท์และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ภายในท่อกลมที่ $PR = 0.5, 1.0$ และ 1.5 เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง $67.02-164.81$ ที่ $PR = 0.5$ ในช่วงของ $Re = 4,000-20,000$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ผลของอัตราส่วนพิตซ์ที่ให้ผลลัพธ์เรียงจากมากไปน้อยคือ $PR = 0.5, 1.0$ และ 1.5 ตามลำดับ

ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เมื่อใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนพิตซ์ $PR = 0.5, 1.0$ และ 1.5 ที่สภาวะตัวแปร $BR = 0.1$ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000-20,000$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.46



รูปที่ 6.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ที่ PR= 0.5, 1.0 และ 1.5 เทียบกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

จากรูปที่ 6.46 แสดงให้เห็นค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ภายในท่อกลมที่ PR = 0.5, 1.0 และ 1.5 ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มค่า PR ทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลง โดยค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.15-0.14 ที่ PR = 1.5 ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 3.65-5.61 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ PR = 1.5 ในช่วงของ Re = 4,000-20,000 ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 เช่นเดียวกัน และผลของอัตราส่วนพิตซ์ที่ให้ผลลัพธ์เรียงจากมากไปน้อยคือ PR = 0.5, 1.0 และ 1.5 ตามลำดับ



รูปที่ 6.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของ $PR = 0.5, 1.0$ และ 1.5 ที่ $BR = 0.1$

สามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่า PR เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้อัตราส่วนเลขนัสเซลท์และค่าอัตราส่วนประกอบเสียดทานลดน้อยลง เมื่อ PR ลดลง จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และค่าอัตราส่วนประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของ PR ที่ให้ผลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ดังรูปที่ 6.47 พบว่าที่ $PR = 0.5$ ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 นั้นให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดในช่วง $2.55-1.49$ ที่ $Re = 4,000-20,000$ ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงที่สุด ดังนั้น ในการศึกษาถึงตัวแปรอื่นในหัวข้อถัดไปจะกำหนดให้อัตราส่วนพิตช์ $PR = 0.5$ ในทุกกรณี

6.7 การอภิปรายผลงานวิจัย

จากผลของการศึกษาเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีรูปแบบต่างๆภายในท่อกลม พบว่าให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือ การใส่วงแหวนรูปตัววีรูปแบบต่างๆภายในท่อกลมนั้น สามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหลและยังช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวท่อด้วย แต่เนื่องจากการใส่วงแหวนรูปตัววีแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลกับค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ลดต่ำลง เพราะการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบเสียดทานหลายเท่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษารูปแบบต่างๆที่มีผลกับการช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งได้ทำการศึกษารูปแบบวงแหวนรูปตัววี อัตราส่วนพิทช์ (PR) และอัตราส่วนความสูงของวงแหวนรูปตัววีต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลม (BR) ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววี จากการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้พบว่า การปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีที่มีรูปแบบที่แตกต่างกันนั้น ให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยทำมุมปะทะที่มีขนาด 30 องศา เนื่องจากรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสามารถทำมุมปะทะระหว่างการไหลของของไหลทดสอบกับวงแหวนรูปตัววีได้ดีกว่า ทำให้อัตราตัวประกอบเสียดทานลดลงไปสูง โดยอัตราส่วนความสูงของวงแหวนรูปตัววีต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลม (BR) เท่ากับ 0.1 อัตราส่วนพิทช์ (PR) เท่ากับ 0.5 ของวงแหวนรูปตัววีแบบปรับปรุงที่ 4 ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่เหมาะสมที่สุดในช่วง 2.55-1.49 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์ 4,000-20,000

ผลที่ได้จากการศึกษาวงแหวนรูปตัววีที่ใส่ภายในท่อกลม โดยการปรับปรุงวงแหวนรูปตัววีรูปทรงต่างๆ ในรูปแบบต่างๆ นั้น สามารถสรุปผลที่ได้จากรูปทรงที่มีความเหมาะสมที่สุดในแต่ละกรณี ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สรุปผลที่ดีที่สุดในแต่ละกรณีที่ได้ศึกษาวงแหวนรูปตัววีเมื่อใส่ภายในท่อกลม

กรณีศึกษา	Nu/Nu_0 ($Re = 4,000$ - $20,000$)	f/f_0 ($Re = 4,000$ - $20,000$)	TEF ($Re = 4,000$ - $20,000$)	ลักษณะ วงแหวน
แบบปรับปรุงที่ 1 (แปดเหลี่ยม) BR =0.1, PR =0.5	4.65-3.22	14.51-18.28	1.91-1.22	โมเดล 1 Octagonal
แบบปรับปรุงที่ 2 (แปดเหลี่ยม-วงรี) BR =0.1, PR =0.5	4.21-2.93	8.99-10.81	2.02-1.32	โมเดล 2 Octagonal- Elliptic
แบบปรับปรุงที่ 3 (วงรีรูปไข่) BR =0.1, PR =0.5	5.62-3.34	11.79-12.98	2.47-1.42	โมเดล 3 Oval
แบบปรับปรุงที่ 4 (โอริง) BR =0.1, PR =0.5	4.95-3.19	7.34-9.74	2.55-1.49	โมเดล 4 O-ring
อิทธิพลความสูงของวงแหวนต่อเส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อกลม (BR) BR =0.2, PR =0.5	6.25-3.86	23.11- 27.04	2.19-1.29	โมเดล 4 O-ring
อิทธิพลของอัตราส่วนพิทช์ (PR) BR =0.1, PR =1.5	3.53-2.62	3.65-5.61	2.29-1.48	โมเดล 4 O-ring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรมและเอกสารอ้างอิง

- [1] V. Kongkai-paiboon, K. Nanan, S. Eiamsa-ard(2010). Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators, *Heat and Mass Transfer*, vol.37, pp. 568 – 574.
- [2] W. Jedsadaratanachai, N. Jayranaiwachira, P. Promvong(2015). 3D numerical study on flow structure and heat transfer in a circular tube with V-baffles, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol.23, pp. 342–349.
- [3] W. Chingtuaythong, P. Promvong, C. Tianpong, M. Pimsarn(2017). Heat transfer characterization in a tubular heat exchanger with V-shaped rings, *Applied Thermal Engineering*, vol.110, pp. 1164–1171.
- [4] S. Skullong, P. Promvong, N. Jayranaiwachira, C. Tianpong (2016). Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts, *Chemical Engineering and Processing*, vol.109, pp. 164–177.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้