

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อกลมด้วยการใส่แหวนวอร์เท็กซ์

NUMERICAL HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A ROUND TUBE WITH  
VORTEX RINGS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อกลมด้วยการใส่แหวนวอร์เท็กซ์

NUMERICAL HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A ROUND TUBE WITH  
VORTEX RINGS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A ROUND TUBE WITH  
VORTEX RINGS



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์


สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อกลมด้วยการใส่แหวนวอร์เท็กซ์

Numerical heat transfer enhancement in a round tube with vortex rings

ผู้จัดทำ

1. นาย เฉลิมพล สรรพทรัพย์ศิริ รหัสประจำตัว 56010235
2. นาย พสธร วิริยะวิธสังจา รหัสประจำตัว 56010828
3. นาย วิวิทย์ ตั้งวิญญู รหัสประจำตัว 56011147

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อกลมด้วยการใส่แหวนวอคเท็กซ์

นายเฉลิมพล สรรพทรัพย์ศิริ 56010235  
นายพศธร วิริยะวิธสังจา 56010828  
นายวิวิทย์ ตั้งวิญญู 56011147  
รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2559

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อกลมที่มีฟลักซ์ความร้อนสม่ำเสมอ โดยมีการใส่วงแหวนเอียงรูปร่างต่างๆได้แก่วงแหวนกลม, แหวนวงรี, วงแหวนสี่เหลี่ยม, วงแหวนห้าเหลี่ยม, วงแหวนหกเหลี่ยมและวงแหวนแปดเหลี่ยม โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรม ANSYS ในงานวิจัยนี้กำหนดให้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ไหลเข้าสู่ท่อโดยมีตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 3000 ถึง 25000 การใส่วงแหวนเอียงจะช่วยให้เกิดกระแสหมุนวนขึ้นตลอดทั้งท่อ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความปั่นป่วนส่งผลให้ของไหลเย็นบริเวณกลางท่อถูกส่งไปแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีการให้ความร้อน จากการเปรียบเทียบผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างท่อที่ใส่และไม่ใส่วงแหวนพบว่าท่อที่มีการใส่วงแหวนจะมีการถ่ายเทความร้อนและความดันตกที่สูงมากกว่าท่อที่ไม่มีการใส่วงแหวน นอกจากนี้การใส่วงแหวนยังช่วยทำให้ค่าสมรรถนะความร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่าท่อที่ไม่มีการใส่วงแหวน โดยสมรรถนะความร้อนของท่อที่ใส่วงแหวนเรียงลำดับจากมากไปน้อยตามรูปร่างของวงแหวนได้ดังนี้ วงแหวนวงรี, แหวนกลม, แปดเหลี่ยม, หกเหลี่ยม, ห้าเหลี่ยม, และสี่เหลี่ยม ตามลำดับ

คำสำคัญ – การวิเคราะห์เชิงตัวเลข; การถ่ายเทความร้อน; แหวนวอคเท็กซ์; การไหลแบบปั่นป่วน

## Numerical heat transfer enhancement in a round tube with vortex rings

Chalermpon Suppasubsiri 56010235

Phojsathorn Wiriyavitsajjar 56010828

Wiwit Thungwinyoo 56011147

Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge Advisor

Year 2559

### ABSTRACT

This project deals with a numerical study on heat transfer enhancement in a uniform heat-fluxed tube fitted with various inclined vortex rings, namely, circular ring, elliptical ring, rectangular ring, pentagonal ring, hexagonal ring and octagonal ring with the assistance of a simulation program called ANSYS. In the present study, air as the test fluid enters the tube with Reynolds number ranging from 3000 to 25,000. The insertion of inclined vortex rings into the tube gives rise to a pair of counter-rotating vortices throughout the tube that help increase the turbulence intensity leading to the transport of colder fluid from the core flow to the heated-wall regions. By comparing the simulation results between tubes with and without vortex rings, it is found that the tube with inclined rings shows extremely higher heat transfer and pressure drop than the smooth tube alone. In addition, all the vortex rings provide considerably higher thermal performance than the smooth tube with no ring. The inclined vortex rings that yield the maximum thermal performance are in sequence as follows: elliptical, circular, octagonal, hexagonal, pentagonal, and rectangular rings.

Keywords — Numerical analysis; Heat transfer; Vortex ring; Turbulent flow

# กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความช่วยเหลือจากคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลหลายท่านด้วยกัน หนึ่งในนั้นคือ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและคอยให้คำแนะนำต่างๆตลอดจนให้ความช่วยเหลือคณะผู้จัดทำ อีกท่านหนึ่งที่คอยให้คำแนะนำคือ ดร.สมบัติ ทำนา อาจารย์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้แก่คณะผู้จัดทำมา ณ ที่นี้ด้วย

นายเฉลิมพล    สรรพทรัพย์สิริ  
นายพสธร        วิริยะวิธสังจา  
นายวิวิทย์      ตั้งวิญญู



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	3
2.1 Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators.....	3
2.2 Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings.....	3
2.3 Heat transfer characterization in a tubular heat exchanger with V-shaped rings.....	4
บทที่ 3 การไหลในท่อและการถ่ายเทความร้อน.....	5
3.1 ลักษณะทั่วไปสำหรับการไหลภายในท่อ.....	5
3.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน.....	6
3.2.1 เลขเรย์โนลด์.....	6
3.2.2 การกระจายความเร็วสำหรับการไหลเต็มท่อ.....	7
3.2.3 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว.....	8
3.3 การถ่ายเทความร้อน.....	10
3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย.....	11
3.3.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้ว.....	12

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การสมดุลของพลังงาน.....	14
3.4.1 กรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่.....	15
3.4.2 กรณีอุณหภูมิที่ผิวคงที่.....	16
3.5 สหพันธ์การพาความร้อนภายในท่อ.....	17
3.6 สมรรถนะเชิงความร้อน.....	19
บทที่ 4 การคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล.....	20
4.1 บทนำ.....	20
4.2 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	20
4.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	20
4.3.1 ชั้นก่อนประมวลผล.....	21
4.3.2 ชั้นประมวลผล.....	21
4.3.3 ชั้นแสดงผล.....	22
4.4 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	22
4.4.1 ความเข้ากันได้.....	22
4.4.2 เสถียรภาพการคำนวณ.....	22
4.4.3 การลู่เข้าของผลเฉลย.....	22
4.4.4 การอนุรักษ์.....	23
4.4.5 ความจำกัดขอบ.....	23
4.4.6 ความเสมือนจริง.....	23
4.4.7 ความแน่นอน.....	23
4.5 รูปแบบการจัดวางกริด.....	24
4.6 การ discretize เพื่อสมการอนุรักษ์พลังงาน.....	25
4.6.1 การ discretize เพื่อเทอมไม่คงตัว.....	26
4.6.2 การ discretize เพื่อการพา.....	27
4.6.3 การ discretize เพื่อเทอมการแพร่.....	28
4.7 การ discretize เพื่อสมการนาเวียร์-สโตกส์.....	29
บทที่ 5 การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ.....	37
5.1 บทนำ.....	37
5.2 สมการควบคุมและสมมติฐาน.....	37

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ.....	38
5.4 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลอง.....	38
5.4.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริด.....	40
5.4.2 การตรวจสอบแบบจำลองการปั่นป่วน.....	40
5.4.3 การตรวจสอบระยะห่างระหว่างเส้นรอบวงนอกของวงแหวนกับผิวท่อ.....	41
5.5 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
บทที่ 6 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย.....	46
6.1 บทนำ.....	46
6.2 วงแหวนสี่เหลี่ยม.....	46
6.2.1 โครงสร้างการไหล.....	47
6.2.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	48
6.3 วงแหวนห้าเหลี่ยม.....	52
6.3.1 โครงสร้างการไหล.....	52
6.3.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	54
6.4 วงแหวนหกเหลี่ยม.....	57
6.4.1 โครงสร้างการไหล.....	58
6.4.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	59
6.5 วงแหวนแปดเหลี่ยม.....	63
6.5.1 โครงสร้างการไหล.....	63
6.5.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	65
6.6 วงแหวนกลม.....	68
6.6.1 โครงสร้างการไหล.....	69
6.6.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	70
6.7 วงแหวนวงรี.....	74
6.7.1 โครงสร้างการไหล.....	75
6.7.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	76
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	80
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	80
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	81

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เปรียบเทียบระหว่างการไหลแบบราบเรียบกับการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับการไหลเต็มท่อ.....	8
3.2 ค่า $Nu$ และ $f$ สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อพื้นที่หน้าตัดต่างๆกัน.....	18
5.1 แสดงลักษณะรูปร่างของวงแหวนแต่ละกรณีศึกษา.....	43



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทดลองใส่วงแหวนกลมในท่อ.....	3
2.2 การทดลองใส่วงแหวนกลมเอียงในท่อ.....	4
2.3 การทดลองใส่วงแหวนพับริบูรณ์ในท่อ.....	4
3.1 บริเวณปากทางเข้าและบริเวณการไหลเต็มท่อสำหรับการไหลภายในท่อ.....	6
3.2 การกระจายความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน.....	7
3.3 แผนภูมิมิติ.....	10
3.4 การก่อดำของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม.....	10
3.5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลในท่อ.....	14
4.1 ความเชื่อมโยงของกระบวนการดิสเครทไทต์และผลเฉลยประมาณค่า.....	21
4.2 แนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ.....	24
4.3 การจัดวางกริดแบบโครงสร้างปกติ.....	24
4.4 การจัดวางกริดแบบไม่เป็นโครงสร้าง.....	25
4.5 ส่วนแรเงาแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ.....	25
4.6 การกระจายตัวของความดันกระเพื่อมหรือปัญหากระดานหมากรุก.....	31
4.7 การจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนในสองมิติ.....	31
4.8 เวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาเยล.....	34
4.9 เวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาวิเซล.....	35
5.1 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวน.....	37
5.2 แบบจำลองสามมิติของท่อกลมที่มีวงแหวนวอคเคซ์ด้านใน.....	39
5.3 แบบจำลองสามมิติของท่อกลมที่มีวงแหวนวอคเคซ์ด้านในแบบ 1 โมดูล.....	39
5.4 ลักษณะกริดอิสระที่ใช้ในการจำลองการไหลสามมิติ.....	39
5.5 กราฟระหว่าง Nu กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับแบบจำลองการปั่นป่วนแต่ละรูปแบบ.....	40
5.6 กราฟระหว่าง f กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับแบบจำลองการปั่นป่วนแต่ละรูปแบบ.....	41
5.7 กราฟระหว่าง Nu กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับการแบบจำลอง โดยใช้ช่องว่างเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร.....	42
5.8 กราฟระหว่าง f กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับการแบบจำลอง โดยใช้ช่องว่างเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร.....	42
6.1 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวนสี่เหลี่ยม.....	47
6.2 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่วงแหวนสี่เหลี่ยมด้านใน.....	47

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวาง ภายในท่อที่มีการใส่วงแหวนสี่เหลี่ยมด้านใน.....	48
6.4 แผนภูมิแสดงเลขนซ์เชลท์บนผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนสี่เหลี่ยมด้านใน.....	48
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชลท์.....	50
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชลท์.....	50
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน.....	51
6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	51
6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน.....	52
6.10 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวนห้าเหลี่ยม.....	52
6.11 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่วงแหวนห้าเหลี่ยมด้านใน.....	53
6.12 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวาง ภายในท่อที่มีการใส่วงแหวนห้าเหลี่ยมด้านใน.....	53
6.13 แผนภูมิแสดงเลขนซ์เชลท์บนผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนห้าเหลี่ยมด้านใน.....	54
6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชลท์.....	54
6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชลท์.....	56
6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน.....	56
6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	57
6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน.....	57
6.19 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวนหกเหลี่ยม.....	58
6.20 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่วงแหวนหกเหลี่ยมด้านใน.....	58
6.21 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวาง ภายในท่อที่มีการใส่วงแหวนหกเหลี่ยมด้านใน.....	59
6.22 แผนภูมิแสดงเลขนซ์เชลท์บนผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนหกเหลี่ยมด้านใน.....	59
6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชลท์.....	61
6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชลท์.....	61
6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน.....	62
6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	62
6.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน.....	63
6.28 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวนแปดเหลี่ยม.....	63
6.29 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่วงแหวนแปดเหลี่ยมด้านใน.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.30 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวาง ภายในท่อที่มีการใส่วงแหวนแปดเหลี่ยมด้านใน.....	64
6.31 แผนภูมิแสดงเลขนซ์เชลท์บนผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนแปดเหลี่ยมด้านใน.....	65
6.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชลท์.....	66
6.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชลท์.....	67
6.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน.....	67
6.35 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	68
6.36 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน.....	68
6.37 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวน.....	69
6.38 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่วงกลมด้านใน.....	69
6.39 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวาง ภายในท่อที่มีการใส่วงกลมด้านใน.....	70
6.40 แผนภูมิแสดงเลขนซ์เชลท์บนผนังท่อที่มีการใส่วงกลมด้านใน.....	70
6.41 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชลท์.....	72
6.42 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชลท์.....	72
6.43 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน.....	73
6.44 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	73
6.45 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน.....	74
6.46 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวนวงรี.....	74
6.47 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่วงรีด้านใน.....	75
6.48 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวาง ภายในท่อที่มีการใส่วงรีด้านใน.....	75
6.49 แผนภูมิแสดงเลขนซ์เชลท์บนผนังท่อที่มีการใส่วงรีด้านใน.....	76
6.50 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชลท์.....	77
6.51 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชลท์.....	78
6.52 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน.....	78
6.53 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน.....	79
6.54 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน.....	79

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนซึ่งเทคนิคเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อทำให้ระบบมีความกะทัดรัดมากขึ้น ลดขนาดของเครื่องและลดกำลังของปั๊มที่ต้องใช้เพื่อที่จะลดต้นทุนในการใช้งาน โดยเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 วิธี วิธีแรก คือ แอคทีฟ เมธอด (Active method) ซึ่งต้องใช้กำลังจากภายนอก เช่น การช่วยเหลือเชิงกล, การฉีกและการดูดของไหลและการใช้สนามไฟฟ้าสถิตย์ ส่วนอีกวิธีคือ แพสซีฟ เมธอด (Passive method) ที่ไม่ต้องใช้กำลังจากภายนอก โดยปกติแล้ววิธีแพสซีฟ เมธอด (Passive method) เป็นวิธีที่นิยมมากกว่าซึ่งวิธีนี้ประกอบไปด้วย การขูดเคลือบผิวท่อ, การกัดผิวท่อ, ผิวท่อที่ขรุขระ, ผิวที่ยื่นออกมา, ท่อเกลียว, สารเติมแต่งสำหรับของเหลวและก๊าซ, เทอร์บูเลเตอร์(ขดลวดและวงแหวนทรงกรวย) และเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน อุปกรณ์ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ แพสซีฟ (Passive) ที่สำคัญและมักถูกใช้เพื่อสร้างกระแสไหลวนในระบบความร้อน การใส่เครื่องกำเนิดกระแสหมุนวนในท่อกลมเป็นเทคนิคพื้นฐานสำหรับการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่บริเวณผิวท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องมาจากการสร้างและการใช้งานที่ง่ายรวมไปถึงค่าบำรุงรักษาที่ต่ำ ทั้งนี้สมรรถนะของเทอร์บูเลเตอร์หรือเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวนนั้นขึ้นอยู่กับรูปทรงของมันอย่างมาก เป็นเวลาหลายปีมาแล้วที่ได้มีการทดลองเพื่อการใช้เครื่องกำเนิดกระแสหมุนวนในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อเย็นหรือร้อนที่ถูกใส่เครื่องกำเนิดกระแสหมุนวนในแบบต่างๆ

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อกลมที่มีการใส่วงแหวนเข้าไป โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรมแอนซิส (ANSYS) เพื่อที่จะศึกษาและปรับปรุงรูปทรงต่างๆของวงแหวน ให้มีสมรรถนะความร้อนที่สูงขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษางานวิจัยโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

1.2.2 เพื่อศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหลการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อมและสมรรถนะเชิงความร้อนของการไหลภายในท่อกลมที่มีการใส่แหวนเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

1.2.3 เพื่อพัฒนาและปรับปรุงการใส่แหวนในท่อกลมรูปแบบต่างๆ นำไปสู่การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน, การลดค่าตัวประกอบเสียดทานและการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ทำการศึกษาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) โดยศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในรูปของตัวเลขนซ์เซลล์ท์และค่าตัวประกอบเสียดทาน

1.3.2 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ

1.3.3 ศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้อยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 3000 ถึง 25,000

1.3.4 การคำนวณของความเร็วและความดันใช้กระบวนการวิธีแบบซิมเปิล (SIMPLE)

1.3.5 เทอมของการพาใช้การคำนวณแบบควิก (QUICK)

1.3.6 พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ

1.3.7 ทำการวิจัยเฉพาะที่อุณหภูมิที่มีการให้ความร้อนที่ผนังแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ 600 วัตต์ต่อตารางเมตร

1.3.8 คุณสมบัติของของไหลคงที่

1.3.9 ไม่คำนึงถึงผลของการแผ่รังสีความร้อน

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อกลมเพื่อทำการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัย

1.4.2 กำหนดรูปร่างของแหวนวอเทคซ์และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนโปรแกรมพร้อมกับการเลือกขนาดและจำนวนกริดที่เหมาะสม

1.4.3 ตรวจสอบโปรแกรมโดยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองการไหลกับผลที่ได้จากการทดลอง

1.4.4 เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้แก่ รูปร่างของแหวนวอเทคซ์ มุมปะทะ อัตราส่วนการขวาง (Blockage ratio) และอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) เพื่อให้ได้รูปแบบที่มีสมรรถนะทางความร้อนที่ดีที่สุด

1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองการไหล นำข้อมูลมาแสดงค่าในรูปพารามิเตอร์ไร้หน่วยและแสดงผลในรูปกราฟความสัมพันธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 พัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีสมรรถนะทางความร้อนที่สูงขึ้น

1.5.2 สามารถนำหลักการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆได้

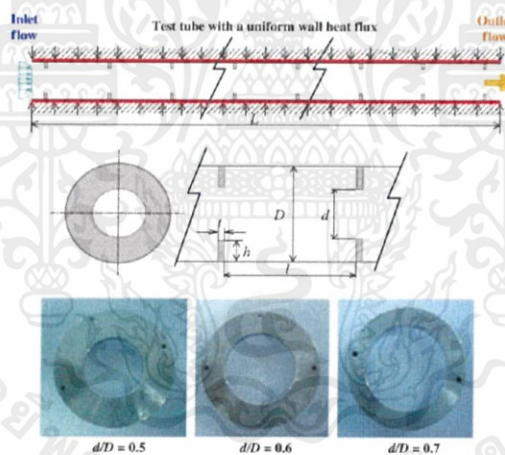
1.5.3 เป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติม

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทรรศน์

#### 2.1 Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators

Kongkaitpaiboon et al. ได้ทำการทดลองโดยใช้วงแหวนใส่เข้าไปในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ใช้เลขเรย์โนลด์มีค่าตั้งแต่ 4000 ถึง 20,000 แล้วเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter ratio) และ ค่าอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) จากผลการทดลองอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อที่ใส่วงแหวนเข้าไปมีค่าเพิ่มประมาณ 57% ถึง 195% เปรียบเทียบกับท่อเปล่า ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการใช้งาน นอกจากนี้ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าวงแหวนที่มีค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter ratio) และ ค่าอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) น้อยที่สุดจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันตกมากที่สุด



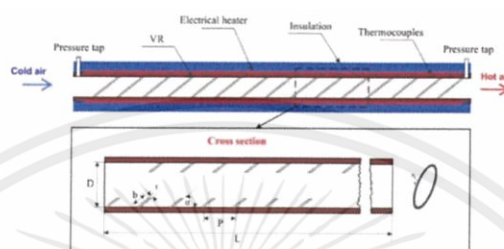
รูปที่ 2.1 การทดลองใส่วงแหวนกลมในท่อ

#### 2.2 Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings

Promvong et al. ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะความร้อนของท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการใส่วงแหวนเอียง 30 องศาเข้าไปในท่ออย่างต่อเนื่อง โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบในท่อ ใช้เลขเรย์โนลด์มีค่าตั้งแต่ 5000 ถึง 26,000 แล้วเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการขวาง (Blockage ratio) และ ค่าอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

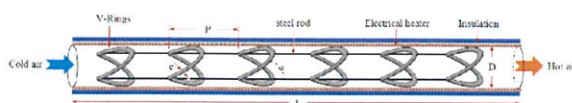
ร้อนและการเกิดความดันลด จากผลการศึกษาพบว่า ผลกระทบของการมีอยู่ของวงแหวน ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและความดันลดมากกว่าท่อเรียบธรรมดา ยิ่งค่าอัตราส่วนการขวาง (Blockage ratio) มากขึ้นจะยิ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ค่าอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) ให้ผลตรงกันข้าม อย่างไรก็ตามเมื่อใช้วงแหวนเอียงโดยที่ค่าอัตราส่วนการขวาง (Blockage ratio) = 0.1 และค่าอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) = 0.5 จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.2 การทดลองใส่วงแหวนกลมเอียงในท่อ

### 2.3 Heat transfer characterization in a tubular heat exchanger with V-shaped rings

Chingtuaythong et al. ได้ทดลองโดยการใส่วงแหวนรูปตัว V ลงในท่อที่มีการให้ความร้อนคงที่ในลักษณะด้านการไหล ในการทดลอง ได้มีการใส่วงแหวนรูปตัว V เอียงทำมุม 30 องศาลงในท่อ แล้วเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) และ ค่าอัตราส่วนการขวาง (Blockage ratio) โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบในการทดสอบและกำหนดเลขเรย์โนลด์ที่ 5000 ถึง 25000 จากผลการทดลองพบว่า วงแหวนรูปตัว V สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้เป็น 5.8 เท่าของท่อปกติและตัวประกอบความเสียดทานก็เพิ่มขึ้น 82 เท่า การเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนการขวาง (Blockage ratio) ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) ให้ผลตรงกันข้าม อย่างไรก็ตามจากผลการทดลอง ค่าอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) และ ค่าอัตราส่วนการขวาง (Blockage ratio) ที่ให้สมรรถนะสูงสุดคือ 1.0 และ 0.1 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนอื่นๆแล้ว วงแหวนรูปตัว V จะให้สมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าวงแหวนเอียง, ขดลวด, และเทปเกลียว



รูปที่ 2.3 การทดลองใส่วงแหวนพับริปตัววีในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

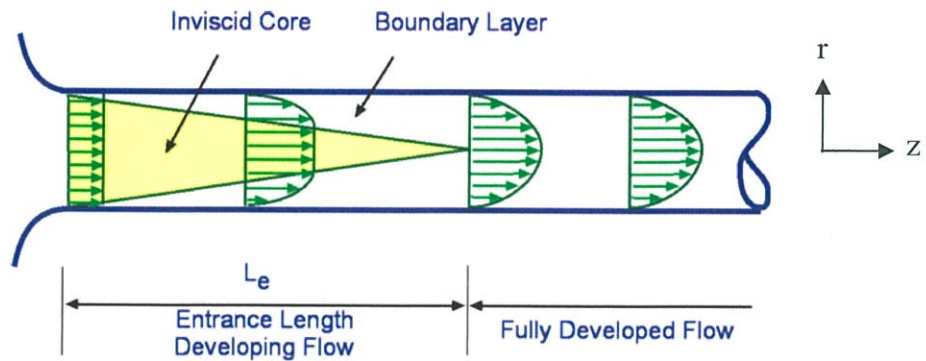
## บทที่ 3

# การไหลในท่อและการถ่ายเทความร้อน

การไหลของของไหลภายในท่อมักมีข้อจำกัดคือความหนาของชั้นขอบเขต (Boundary layer) เพราะว่าเมื่อของไหลไหลไปได้ระยะหนึ่ง ชั้นขอบเขตก็จะก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อและรูปร่างความเร็วจึงมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงอีกต่อไป ช่วงที่ความหนาของชั้นขอบเขตมีการเพิ่มขึ้นจะเรียกว่า การไหลที่กำลังปรับตัว (Developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region และเมื่อความหนาของชั้นขอบเขตก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อ จะเรียกว่าการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed flow)

### 3.1 ลักษณะทั่วไปสำหรับการไหลภายในท่อ

การไหลภายในท่อจากจุดไปยังอีกจุดหนึ่งได้นั้นจะต้องมีความดันแตกต่างกันระหว่างจุดทั้งสอง ของไหลจึงจะสามารถไหลผ่านท่อไปได้ รูป 3.1 เป็นการไหลเข้าท่อด้วยความเร็วคงตัว ผลของความหนืดบริเวณใกล้กับผนังท่อจะเกิดความต้านทานต่อการไหล ทำให้เกิดชั้นขอบเขตบริเวณใกล้กับผนังท่อ ภายใต้สมมติฐานว่าไม่มีการสั่นไหลที่ผนังท่อ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งตามความยาวท่อในบริเวณใกล้ๆทางเข้าท่อนั้นพบว่าความเร็วเปลี่ยนแปลงกับระยะทางที่วัดในแนวตั้งฉากกับผนังท่อและเกิดความเค้นเฉือนกระทำต่อของไหลในทิศตรงกันข้ามกับการไหล และในบริเวณนี้ยังพบว่าโปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile) เปลี่ยนแปลงในทิศการไหลอีกด้วย บริเวณดังกล่าวนี้เรียกว่า บริเวณปากทางเข้า (Entrance region) เมื่อของไหลไหลผ่านท่อในช่วงต่อไป ชั้นขอบเขตจะพัฒนาจนความหนาชั้นขอบเขตเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงแนวเส้นศูนย์กลางท่อ สำหรับบริเวณที่อยู่ภายนอกบริเวณการไหลชั้นขอบเขตจะเป็นบริเวณที่ไม่มีผลของความหนืด (Inviscid core) ในบริเวณปากทางเข้านั้น การกระจายความเร็วจะเปลี่ยนแปลงกับระยะตามพิกัด  $r$  และระยะในทิศการไหลตามพิกัด  $z$  ( $u = u(r, z)$ ) เมื่อของไหลไหลผ่านบริเวณปากทางเข้า ความเร็วจะไม่ขึ้นกับระยะทางในทิศการไหลแต่ความเร็วจะขึ้นกับพิกัด  $r$  เท่านั้นและพบว่า การกระจายความเร็วที่หน้าตัดของท่อที่ตำแหน่งใดๆตามความยาวท่อนั้นจะเป็นฟังก์ชันของระยะตามพิกัด  $r$  เท่านั้น  $u = u(r)$  ทำให้โปรไฟล์ความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงตามทิศการไหลในบริเวณการไหลเต็มท่อนี้



รูปที่ 3.1 บริเวณปากทางเข้าและบริเวณการไหลเต็มท่อสำหรับการไหลภายในท่อ

### 3.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลภายในท่อสามารถจำแนกตามระดับความเร็วของการไหลเป็น 2 แบบ ได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) การไหลแบบราบเรียบจะพบว่าอนุภาคของไหลในชั้นของไหลหนึ่งๆ (Layer) จะยังคงอยู่ในชั้นของไหล เมื่อเกิดการไหลของชั้นของไหลหนึ่งบนอีกชั้นของไหลหนึ่งนั้นจะไม่เกิดการหมุนวน (Swirl) ตรงกันข้ามกับการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งการไหลจะมีอัตราการไหลที่สูง มีการไหลวน หมุนตัว และวนเวียนไปมาตลอดหน้าตัดท่อขณะที่ของไหลไหลผ่าน

#### 3.2.1 เลขเรย์โนลด์

โดยทั่วไปแล้วของไหลที่ไหลอยู่ได้ต่อเนื่องนั้นเนื่องจากมีแรงเฉื่อยกระทำในทิศการไหลและขณะเดียวกันจะมีแรงหนืดจากความหนืดกระทำในทิศตรงข้ามกับทิศการไหล ของไหลดังกล่าวจะไหลเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงหนืดเนื่องจากความหนืด ถ้าอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงหนืดมีความหนืดมีค่าสูงของไหลจะไหลเร็วมาก ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าต่ำของไหลจะไหลช้า ซึ่งอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงหนืดเนื่องจากความหนืด ก็คือ เลขเรย์โนลด์ โดยเลขเรย์โนลด์นี้ใช้เป็นเลขกำหนดแบบการไหลภายในท่อ เขียนความสัมพันธ์และสมการของเลขเรย์โนลด์ได้ดังนี้

$$Re = \frac{\text{แรงเฉื่อย}}{\text{แรงหนืดจากความหนืด}} = \frac{\rho V^2 D^2}{\mu V L} \quad (3.1)$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (3.2)$$

โดยที่  $V$  คือความเร็วเฉลี่ยของการไหล

$D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

$\mu$  คือความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล

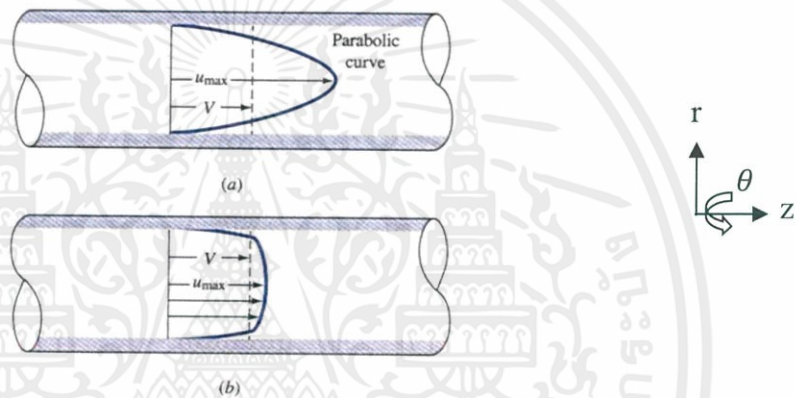
$\nu$  คือความหนืดจลน์ของของไหล

สำหรับระยะปากทางเข้านั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืด โดยพิจารณาจาก

$$\left(\frac{x_{fd,h}}{D_h}\right)_{lam} = 0.05Re_D \quad (3.3)$$

$$\left(\frac{x_{fd,h}}{D_h}\right)_{tur} = 4.4Re_D^{1/6} \quad (3.4)$$

### 3.2.2 การกระจายความเร็วสำหรับการไหลเต็มท่อ



รูปที่ 3.2 การกระจายความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

พิจารณาองค์ประกอบความเร็วใน 3 มิติพิกัด  $r-\theta-z$  สำหรับการไหลในท่อในสถานะไม่คงตัว ดังนั้น ความเร็วย่อยในแต่ละทิศทางจะกำหนดเป็น  $v_z = v_z(r, \theta, z, t)$  สำหรับการไหลแบบราบเรียบเต็มท่อนั้น พบว่าความเร็วขณะใดขณะหนึ่งของของไหลขึ้นอยู่กับทิศทางตามแนวแกนท่อ ( $v_z$ ) เท่านั้น โดยที่  $v_\theta = v_r = 0$  และพบว่า  $v_z$  นี้เป็นฟังก์ชันของพิกัด  $r$  เท่านั้น นั่นคือ  $v_z = v_z(r)$  และการกระจายความเร็วอยู่ในรูป พาราโบลา ดังรูป 3.2(a) การไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนเต็มท่อนั้นจะทำให้การกระจายความเร็วที่แตกต่างกัน สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนพบว่าความเร็วย่อย ( $v_r, v_\theta, v_z$ ) ทุกตัวไม่เป็นศูนย์และความเร็วยังขึ้นกับเวลาด้วย การพิจารณาความเร็วย่อยแต่ละตัวจะอาศัยข้อมูลจากผลการทดลอง ในรูป 3.2(b) แสดงความเร็วย่อยในแนวแกน ( $v_z$ )

ในตาราง 3.1 สรุปการเปรียบเทียบระหว่างการไหลแบบราบเรียบกับการไหลแบบปั่นป่วน

ตาราง 3.1 เปรียบเทียบระหว่างการไหลแบบราบเรียบกับการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับการไหลเต็มท่อ

รายละเอียด	การไหลแบบราบเรียบ	การไหลแบบปั่นป่วน
ความเร็ว	$v_z = v_z(r)$ เท่านั้น โดยที่ $v_r = v_\theta = 0$	$v_r, v_\theta, v_z$ ไม่เป็นศูนย์และ $v_r = v_r(r, \theta, z, t)$ $v_\theta = v_\theta(r, \theta, z, t)$ $v_z = v_z(r, \theta, z, t)$
การกระจายความเร็ว	รูปพาราโบลา โดยหาผลเฉลยจากสมการการเคลื่อนที่ในรูปของ $\frac{v_z}{v_{z,\max}} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2$	พิจารณาโปรไฟล์ความเร็วจากข้อมูลการทดลอง $\frac{\bar{v}_z}{v_{z,\max}} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{1/7}$
ความเร็วเฉลี่ย	$\frac{\bar{v}_z}{v_{z,\max}} = \frac{1}{2}$	$\frac{\bar{v}_z}{v_{z,\max}} = \frac{4}{5}$
เลขเรย์โนลด์	$Re \leq 2100$	$5 \times 10^5 \leq Re \leq 1 \times 10^7$

### 3.2.3 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว

วิศวกรส่วนใหญ่ให้ความสนใจเกี่ยวกับความดันตกคร่อมในการไหลของของไหลภายในท่อ เนื่องจากตัวพารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับการหาขนาดกำลังงานของปั๊มหรือพัดลมโดยตรง ในการหาความดันตกคร่อม เราจะใช้ ตัวประกอบเสียดทานของ Moody ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยนิยามว่า

$$f \equiv \frac{-(dp/dx)D}{\rho \bar{v}^2} \quad (3.5)$$

ค่านี้ต่างกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน  $C_f$  ซึ่งบางครั้งเรียกว่าตัวประกอบเสียดทานเฟนนิ่ง ซึ่งนิยามว่า

$$C_f \equiv \frac{\tau_s}{\rho \bar{v}^2} \quad (3.6)$$

เพราะว่าแรงเฉือนบนผิวของของไหลเท่ากับ(ทิศทางตรงกันข้าม) แรงบนผิวของของไหล ดังนั้นความเค้นเฉือนบนผิวกำหนดเป็น  $\tau_s = -\mu \left(\frac{du}{dr}\right)_{r=r_0}$  ดังนั้นจะได้

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (3.7)$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้วได้

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (3.8)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อผิวเรียบ ตัวประกอบเสียดทานหาได้จาก the first Petukhov equation และใช้สมบัติที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั้งก้อน  $T_b = (T_i + T_o)/2$  คือ

$$f = (0.790 \ln - 1.64)^{-2} \quad 10^4 < Re < 10^6 \quad (3.9)$$

ตัวประกอบเสียดทานของการไหลปั่นป่วนภายในท่อที่มีผิวขรุขระขึ้นกับเรย์โนลด์และความขรุขระสัมพัทธ์ (Relative roughness,  $\epsilon_r/D$ ) ที่เป็นบริเวณโปรไฟล์ความเร็ว Colebrook ได้รวมข้อมูลตัวประกอบเสียดทานทั้งหมดสำหรับการไหลทรานสิชันและปั่นป่วนในท่อเรียบรวมทั้งท่อหยาบเป็นความสัมพันธ์เรียกว่า สมการโคลบรูค (Colebrook equation) คือ

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon_r}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3.10)$$

นอกจากนี้เรารู้ว่าความดันตกคร่อม ( $\Delta p$ ) ระหว่างระยะ  $x_1$  และ  $x_2$  เป็น

$$\Delta p = - \int_{p_1}^{p_2} dp = f \frac{\rho \bar{v}^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx = f \frac{\rho \bar{v}^2}{2D} (x_2 - x_1) \quad (3.11)$$

สำหรับสมการ (3.10) นี้ใช้พลอตเป็นแผนภูมิ ดังรูป 3.3 ซึ่งเรียกว่าแผนภูมิมูดี (Moody chart) ในแผนภูมิมูดีแบ่งเป็นพิจารณาเป็น 4 บริเวณ คือ

1. บริเวณราบเรียบ พบว่า  $f$  ขึ้นอยู่กับ  $Re$  เท่านั้น และมีความสัมพันธ์ในรูปของ  $f = 64/Re$
2. บริเวณวิกฤต เป็นบริเวณที่ระบุแน่นอนไม่ได้ การไหลเป็นทั้งการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน
3. บริเวณการเปลี่ยนแปลง พบว่า  $f$  ขึ้นอยู่กับ  $Re$  และความขรุขระสัมพัทธ์ ( $\epsilon/D$ )
4. บริเวณปั่นป่วน พบว่า  $f$  ขึ้นอยู่กับ ความขรุขระสัมพัทธ์ ( $\epsilon/D$ ) เท่านั้น

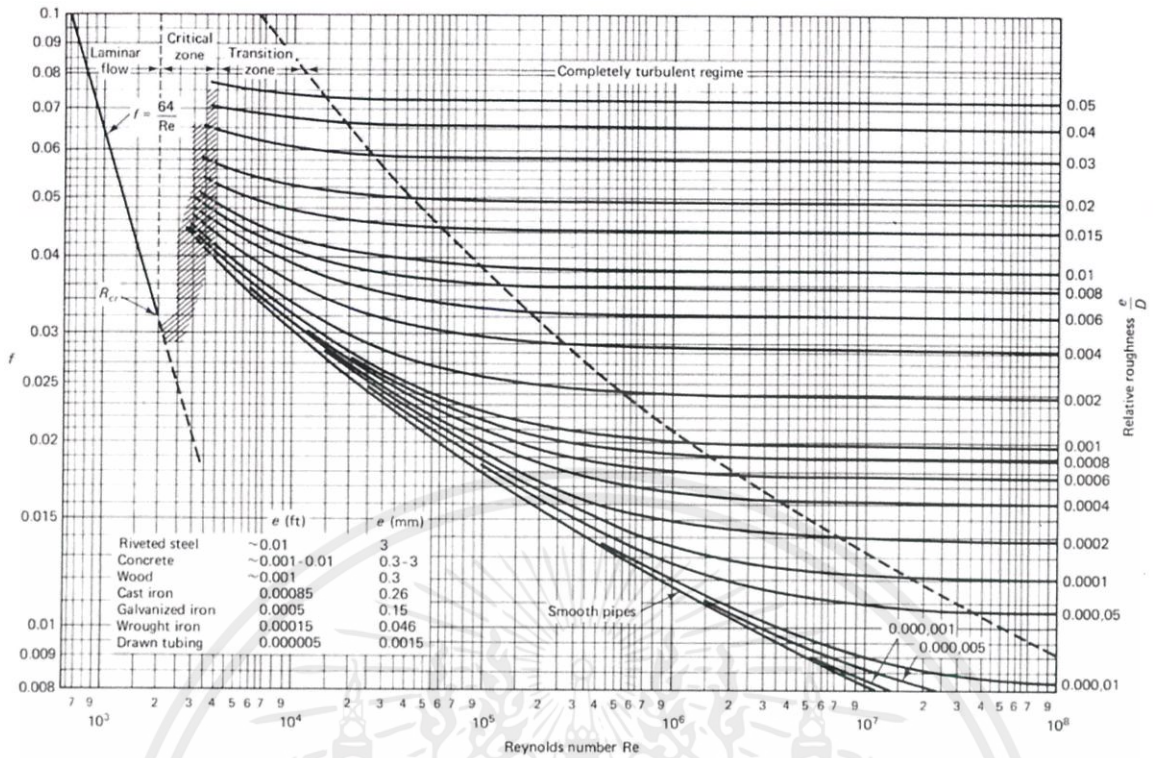
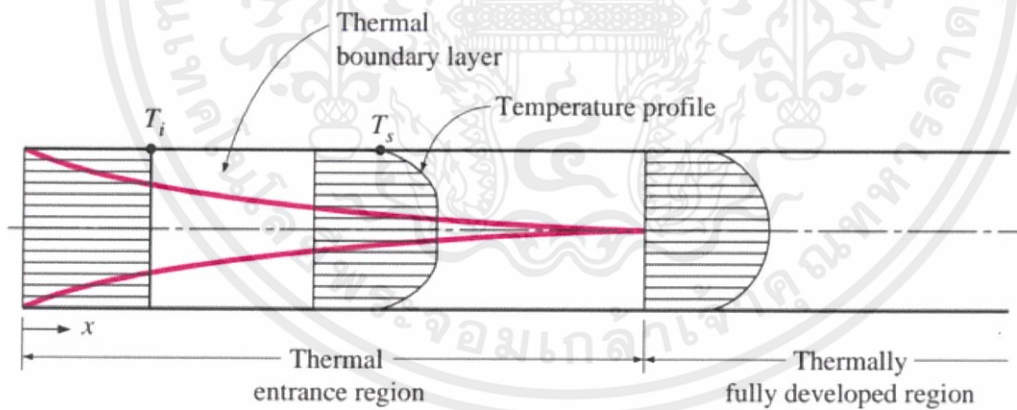


Figure 7.13 Moody diagram. (From L. F. Moody, *Trans. ASME*, Vol. 66, 1944.)

รูปที่ 3.3 แผนภูมิโมดี

3.3 การถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 3.4 การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลม

พิจารณาอิทธิพลของความร้อน ถ้าของไหลไหลเข้าไปในท่อตามรูปที่ 3.4 ที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ  $T(r, 0)$  ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขอบเขตของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอคงที่ ( $T_s$  คงที่)

หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ ( $q_s$  คงที่) สภาวะที่ปรับตัวคงที่แล้วของความร้อน (Thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น ในที่สุดรูปร่างของอุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะแตกต่างกันตามเงื่อนไข ไม่ว่าจะกรณีอุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่

สำหรับการไหลแบบราบเรียบระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัวจะเป็น

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05Re_D Pr \quad (3.12)$$

โดยการเปรียบเทียบบริเวณทางเข้า (Entrance region) ของอุณหภูมิตามสมการ (3.12) กับสมการ (3.3) จะพบว่าต่างกันที่ค่า Pr เท่านั้น จึงพอสรุปได้ว่า ถ้า  $Pr > 1$  แล้ว ชั้นขอบเขตไฮโดรไดนามิกขยายเร็วกว่าชั้นขอบเขตทางความร้อน และจะกลับกันถ้า  $Pr < 1$  สำหรับค่า Pr สูงๆเช่น น้ำมัน  $x_{fd,h}$  จะน้อยกว่า  $x_{fd,t}$  มากและอาจสมมติได้ว่ารูปทรงของความเร็วที่ปรับตัวเต็มที่แล้วมีตลอดช่วงบริเวณทางเข้าของความร้อน ในทางกลับกัน ของไหลที่มีค่า Pr ต่ำมากเช่น โลหะเหลว รูปร่างอุณหภูมิจึงเป็นแบบอัดเต็มที่แล้วได้เร็วมากในขณะที่รูปร่างของความเร็วยังอยู่ในช่วงกำลังก่อตัวอยู่ ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วนเงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระ ไม่ขึ้นกับค่า Pr โดย

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D}\right)_{tur} \approx 10 \quad (3.13)$$

### 3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย

ในเรื่องอุณหภูมินี้ จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_m$ ) ในลักษณะที่เหมือนกับความเร็ว โดยให้ความหมาย

$$T_m = \frac{\int \rho v c_v T dA_c}{m c_v} \quad (3.14)$$

สำหรับท่อกลมและเป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ จะได้ว่า

$$T_m = \frac{2}{v r_0^2} \int_0^{r_0} v T r dr \quad (3.15)$$

ค่าของ  $T_m$  จะเปลี่ยนตามแนว x ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหลซึ่งต่างจากความเร็วที่มีค่าคงที่สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

ฟลักซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆหาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.16)$$

ซึ่ง  $h$  เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใดๆ อย่างไรก็ตามมีความแตกต่างกันระหว่าง  $T_m$  และ  $T_\infty$  เนื่องจาก  $T_\infty$  คงที่ในทิศทางของการไหล ส่วน  $T_m$  ต้องเปลี่ยนแปลงตามทิศทาง นั่นคือ  $dT_m/dx$  จะไม่เป็นศูนย์ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ  $T_m$  เพิ่มตามระยะ  $x$  ถ้าการถ่ายเทความร้อนเป็นไปจากผิวสู่ของไหล ( $T_s > T_m$ ) และ  $T_m$  จะลดลงกับระยะ  $x$  ถ้า  $T_s < T_m$

### 3.3.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้ว

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหลคืออุณหภูมิของไหลต้องยังคงเปลี่ยนแปลงตามระยะ  $x$  สิ่งที่ยากูรู้คือเกิดภาวะ การปรับตัวทางความร้อนเต็มที่แล้วหรือยัง สถานการณ์นี้จะแตกต่างไปจากกรณีการไหลของของไหลที่ซึ่ง  $(\partial u/\partial x) = 0$  ในช่วงบริเวณปรับตัวเต็มที่แล้ว ในทางกลับกันถ้ามีการพาความร้อน ( $dT_m/dx$ ) เช่นเดียวกับ  $(\partial T/\partial x)$  ที่รัศมี  $r$  ใดๆจะไม่เป็นศูนย์ ผลที่ตามมา รูปร่างของอุณหภูมิ  $T(r)$  จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ  $x$  ซึ่งเปรียบเสมือนว่า สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิเพื่อให้ได้เงื่อนไขนี้

สำหรับการนำแบบทรานเซียนท์และสมการอนุรักษ์พลังงาน ได้ความแตกต่างอุณหภูมิไร้มิติในรูป  $(T_s - T)/(T_s - T_m)$  ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอยู่จริงและอัตราส่วนนี้จะเป็นอิสระกับ  $x$  นั่นคือ ถึงแม้ว่า  $T(r)$  ยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ  $x$  แต่รูปร่างสัมพัทธ์ของโปรไฟล์นี้จะไม่เปลี่ยนแปลงเลยและการไหลแบบนี้เรียกว่า การไหลปรับตัวเต็มที่แล้วทางความร้อน (Thermally fully developed) และจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{T_s(x) - T(r,x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right] = 0 \quad (3.17)$$

โดยที่  $T_s$  เป็นอุณหภูมิผิวท่อ

$T$  เป็นอุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

$T_m$  เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ

เงื่อนไขกำหนดให้สำหรับสมการ (3.17) ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่ออาจจะเป็นกรณี  $q_s''$  คงที่หรือ  $T_s$  คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรมเช่น ผนังท่อที่ซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอ จะเป็นกรณีของ  $q_s''$  คงที่ ส่วนกรณีของ  $T_s$  คงที่จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสภาวะเนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่นเกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

สังเกตว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะเกิดเงื่อนไขทั้งสองอย่างนี้พร้อมกัน ถ้า  $q_s''$  คงที่  $T_s$  ต้องแปรเปลี่ยนกับระยะ  $x$

รูปแบบที่สำคัญจำนวนมากของการไหลที่ปรับตัวทางความร้อนแล้ว (Thermally developed flow) มักอ้างถึงสมการ (3.17) เพราะว่าอัตราส่วนอุณหภูมินี้เป็นอิสระกับ  $x$  ค่าอนุพันธ์ของอัตราส่วนนี้เทียบกับ  $r$  ต้องไม่ขึ้นกับ  $x$  การหาค่าอนุพันธ์นี้ที่ผิวท่อ (สังเกตว่า  $T_s$  และ  $T_m$  คงที่) เราจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right] \Big|_{r=r_0} = \frac{-\partial T / \partial r \Big|_{r=r_0}}{T_s - T_m} \neq f(x)$$

แทน  $\partial T / \partial r$  จากกฎของฟูเรียร์ ซึ่งอยู่ในรูป 3.3

$$q_s'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0}$$

และสำหรับ  $q_s''$  จากกฎเย็นตัวของนิวตัน จะได้

$$\frac{k}{h} \neq f(x) \quad (3.18)$$

ดังนั้นการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิของของไหล โดยมีคุณสมบัติต่างๆที่ ค่า  $h$  ที่ตำแหน่งใดๆคงที่ไม่ขึ้นกับระยะ  $x$

สมการ (3.17) ใช้ไม่ได้กับช่วงระยะทางเข้า (Entrance region) ที่ซึ่ง  $h$  แปรตาม  $x$  เพราะที่  $\delta_t = 0$  ที่ทางเข้าของท่อ ดังนั้น  $h$  จะมีค่าสูงมากที่  $x = 0$  อย่างไรก็ตามค่า  $h$  จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดขึ้นขอบเขตทางความร้อนขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งก็คือเข้าสู่ช่วงปรับตัวเต็มที่แล้วนั่นเอง

กรณีพิเศษ สำหรับฟลักซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) คงที่ ทั้งค่า  $h$  และ  $q_s''$  จะคงที่ในช่วงปรับตัวเต็มที่แล้ว จากสมการ (3.16) ได้ว่า

$$\frac{dT_s}{dx} = \frac{dT_m}{dx} \quad q_s'' \text{ constant} \quad (3.19)$$

ถ้ากระจาย (3.17) และหาคำตอบสำหรับ  $\partial T / \partial x$  จะได้

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dT_s}{dx} - \frac{(T_s - T)dT_s}{(T_s - T_m)dx} + \frac{(T_s - T)dT_m}{(T_s - T_m)dx} \quad (3.20)$$

แทนค่าจากสมการ (3.19) จะได้

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dT_m}{dx} \quad q_s'' \text{ constant} \quad (3.21)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวแกนจะเป็นอิสระกับตำแหน่งในแนวรัศมี

สำหรับกรณีของ  $T_s$  คงที่ ( $\frac{dT_s}{dx} = 0$ ) จากสมการ (3.20) จะได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{(T_s - T)dT_m}{(T_s - T_m)dx} \quad T_s \text{ constant} \quad (3.22)$$

โดยที่ค่า  $\frac{\partial T}{\partial x}$  จะขึ้นอยู่กับแนวรัศมี

จากที่กล่าวมาพอเชื่อถือได้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยเป็นตัวแปรที่สำคัญมากสำหรับการไหลภายในท่อ เพื่อที่จะอธิบายการไหลนั้นๆ เราจำเป็นต้องรู้การแปรเปลี่ยนของมันกับค่า  $x$  ซึ่งการแปรเปลี่ยนหาได้โดยการประยุกต์การสมดุลพลังงานทั้งหมดกับการไหล

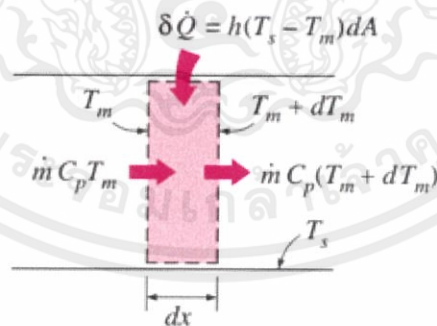
### 3.4 การสมดุลของพลังงาน

พิจารณาการไหลในท่อตามรูปที่ 3.5 ของไหลไหลด้วยอัตราเร็วเชิงมวลคงที่  $\dot{m}$  และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของของไหลรวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางแนวแกนจะไม่นำมาคิด ดังนั้นถ้าไม่มีงานเพล่าซึ่งกระทำโดยของไหลขณะไหลผ่านท่อแล้ว จะมีเพียงอิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและก๊ีบงานจากการไหลเท่านั้น

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

โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 3.5 และจากนิยามของ  $T_m$  จะได้

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



รูปที่ 3.5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลในท่อ

หรือ

$$dq_{\text{conv}} = \dot{m}d(c_v T_m + pv) \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$dq_{\text{conv}} = \dot{m}dc_p T_m \quad (3.24)$$

สมการนี้ใช้ได้สำหรับของเหลวที่อัดตัวไม่ได้เช่นกัน ในกรณีนี้  $c_p = c_v$  และเพราะว่า  $v$  น้อยมากๆ  $d(pv)$  โดยทั่วไปจะน้อยกว่า  $d(c_v T_m)$  มากจนตัดทิ้งได้

รูปพิเศษของสมการ (3.24) เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขสำหรับท่อทั้งหมด โดยการอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อ จะได้

$$dq_{\text{conv}} = \dot{m}c_p(T_{m,o} + T_{m,i}) \quad (3.25)$$

โดยที่  $q_{\text{conv}}$  เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด

สมการ (3.24) อาจเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่สะดวกได้โดยใช้สมการอัตราการพาความร้อนต่อปริมาตรควบคุมคือ  $dq_{\text{conv}} = q_s'' P dx$  ซึ่ง  $P$  เป็นเส้นรอบรูป ( $P = \pi d$ ) สำหรับท่อกลม โดยการแทนค่าจากสมการ (3.16) ได้ว่า

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m}c_p} = \frac{P}{\dot{m}c_p} h(T_s - T_m) \quad (3.26)$$

คำตอบของ (3.26) สำหรับค่า  $T_m(x)$  ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความร้อนที่ผิว คืออาจจะเป็นกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่หรืออุณหภูมิที่ผิวคงที่ก็ได้

### 3.4.1 กรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant surface heat flux)

กรณีนี้จะพบว่าจะง่ายที่จะหาค่า  $q_{\text{conv}}$  ทั้งหมดเพราะว่า  $q_s''$  ไม่ขึ้นกับ  $x$  ดังนั้น

$$dq_{\text{conv}} = q_s''(PL) \quad (3.27)$$

สมการนี้อาจใช้กับสมการ (3.25) เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ( $T_{m,o} + T_{m,i}$ )

สำหรับ  $q_s''$  คงที่จากสมการ (3.26) จะได้

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m}c_p} = f(x) \quad (3.28)$$

อินทิเกรตจาก  $x=0$  ถึง  $x$  ใดๆได้

$$T_m(x) = T_{m,i} + \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} x \quad q_s'' \text{ constant} \quad (3.29)$$

จาก (3.29) ได้ว่า  $T_m$  แปรเปลี่ยนเชิงเส้นกับระยะ  $x$  ตามท่อ

### 3.4.2 กรณีอุณหภูมิที่ผิวคงที่ (Constant surface Temperature)

ผลลัพธ์ที่ได้สำหรับค่า  $q_{\text{conv}}$  และการกระจายของ  $T_m$  แตกต่างกันโดยสิ้นเชิงจากกรณีก่อน สำหรับกรณีนี้นิยามโดย  $\Delta T$  เป็น  $T_s - T_m$  สมการ (3.26) เขียนใหม่เป็น

$$\frac{dT_m}{dx} = -\frac{d\Delta T}{dx} = \frac{P}{\dot{m} c_p} h \Delta T$$

แยกตัวแปรและอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อได้

$$\int_{\Delta T_i}^{\Delta T_o} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\frac{P}{\dot{m} c_p} \int_0^L h dx$$

$$\ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = \frac{PL}{\dot{m} c_p} \left( \frac{1}{L} \int_0^L h dx \right)$$

จากนิยามของ  $\bar{h}$  จะได้

$$\ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = -\frac{PL}{\dot{m} c_p} \bar{h}_L \quad T_s \text{ constant} \quad (3.30a)$$

ซึ่ง  $\bar{h}_L$  หรือ  $\bar{h}$  เป็นค่าเฉลี่ยของ  $h$  สำหรับทั่วท่อทั้งหมด โดยจัดใหม่

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = \frac{T_s - T_{m,o}}{T_s - T_{m,i}} = \exp\left(-\frac{PL}{\dot{m} c_p} \bar{h}_L\right) \quad T_s \text{ constant} \quad (3.30b)$$

ถ้าเราอินทิเกรตจากทางเข้าถึงตำแหน่ง  $x$  ใดๆ จะได้

$$\frac{T_s - T_m(x)}{T_s - T_{m,i}} = \exp\left(-\frac{Px}{\dot{m} c_p} \bar{h}\right) \quad (3.31)$$

โดยที่ค่า  $\bar{h}$  ในสมการนี้เป็นค่าเฉลี่ยของ  $h$  จากทางเข้าของท่อถึง  $x$  สมการนี้ชี้ให้เห็นว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $T_s - T_m$ ) ลดลงเป็นเอกซ์โพเนนเชียลกับระยะทางตามแนวแกนของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาสมการสำหรับ  $q_{conv}$  ทั้งหมดนั้นยุ่งยากมากกับธรรมชาติของเอกซ์โพเนนเชียล โดยใช้สมการ (3.25)

$$q_{conv} = \dot{m}c_p[(T_s - T_{m,i}) - (T_s - T_{m,o})] = \dot{m}c_p(T_i - T_o)$$

และแทนค่า  $\dot{m}c_p$  จากสมการ (3.30a) จะได้

$$q_{conv} = \bar{h}A_s\Delta T_{lm} \quad T_s \text{ constant} \quad (3.32)$$

ซึ่งค่า  $A_s$  เป็นพื้นที่ผิวท่อทั้งหมด ( $A_s = PL$ ) และ  $\Delta T_{lm}$  เป็นค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (LTDM)

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_o - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_o / \Delta T_i)} \quad (3.33)$$

สมการ (3.32) เป็นรูปหนึ่งของกฎการเย็นตัวของนิวตันสำหรับท่อทั้งหมดและ  $\Delta T_{lm}$  เป็นค่าเฉลี่ยของความแตกต่างอุณหภูมิที่เหมาะสมทั่วทั้งความยาวท่อ ธรรมชาติลอการิทึมของความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยนี้เนื่องจากธรรมชาติของการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล แตกต่างจากความแตกต่างเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic mean temperature difference, AMTD) ซึ่งมีรูป  $\Delta T_{am} = (\Delta T_i + \Delta T_o)/2$

### 3.5 สหพันธ์การพาความร้อนภายในท่อ

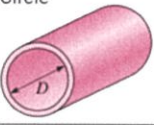
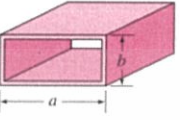
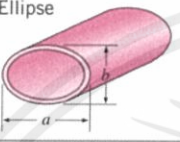
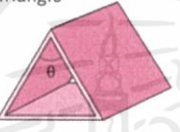
สมการที่กล่าวมาข้างต้นใช้ได้กับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดรูวงกลม สำหรับท่อที่ไม่มีพื้นที่หน้าตัดกลมก็สามารใช้ได้แต่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางจะต้องใช้เส้นผ่านศูนย์กลางสิทธิผลเป็นความยาวเฉพาะ (Characteristic length) ซึ่งเรียกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) และนิยามเป็น

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (3.34)$$

ซึ่ง  $A_c$  และ  $P$  เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของการไหลตามลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลางนี้จะใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น  $Re_D$  และ  $Nu_D$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ สหพันธ์ที่ใช้ในท่อกลมและท่อเหลี่ยมสำหรับหาค่า  $Nu_D$  และ  $f$  แสดงในตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่า  $Nu_D$  และ  $f$  สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อพื้นที่หน้าตัดต่างๆกัน

Tube Geometry	$a/b$ or $\theta^\circ$	Nusselt Number		Friction Factor $f$
		$T_s = \text{Const.}$	$\dot{q}_s = \text{Const.}$	
Circle 	—	3.66	4.36	64.00/Re
Rectangle 	$a/b$			
	1	2.98	3.61	56.92/Re
	2	3.39	4.12	62.20/Re
	3	3.96	4.79	68.36/Re
	4	4.44	5.33	72.92/Re
	6	5.14	6.05	78.80/Re
	8	5.60	6.49	82.32/Re
$\infty$	7.54	8.24	96.00/Re	
Ellipse 	$a/b$			
	1	3.66	4.36	64.00/Re
	2	3.74	4.56	67.28/Re
	4	3.79	4.88	72.96/Re
	8	3.72	5.09	76.60/Re
	16	3.65	5.18	78.16/Re
Triangle 	$\theta$			
	10°	1.61	2.45	50.80/Re
	30°	2.26	2.91	52.28/Re
	60°	2.47	3.11	53.32/Re
	90°	2.34	2.98	52.60/Re
120°	2.00	2.68	50.96/Re	

สหพันธ์อย่างง่ายของเลขนซ์เซิลท์ของการไหลปั่นป่วนในท่อ หาได้จากซิลตัน-โคลเบิร์น อนุโลจี้ (Chilton-Cilburn analogy) ดังสมการ

$$Nu = 0.125fRePr^{1/3} \quad (3.35)$$

เลขนซ์เซิลท์ของการไหลปั่นป่วนในท่อผิวเรียบบริเวณโปรไฟล์ความเร็วและความร้อน ได้จากการแทนตัวประกอบเสียดทานของสมการ (3.9) ลงในสมการ (3.35) เรียกว่า สมการโคลเบิร์น (Colburn equation)

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{1/3} \quad (0.7 \leq Pr \leq 160, Re > 10000) \quad (3.36)$$

Ditus และ Boelter ได้ปรับปรุงสมการ (3.36) ให้มีความถูกต้องและใช้ได้ดีของการไหลปั่นป่วนในท่อ คือ

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^n \quad (3.37)$$

โดยที่  $n = 0.4$  สำหรับการให้ความร้อนและ  $n = 0.3$  สำหรับการให้ความเย็นกับของไหลที่ไหลผ่าน

ท่อ สมบัติของของไหลหาได้ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั้งก่อน  $T_b = (T_i + T_o)/2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของเลขนซ์เซิลท์ข้างต้นมีความคลาดเคลื่อนมากได้ถึงร้อยละ 25 ถ้าต้องการให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 10 ต้องใช้ความสัมพันธ์ที่เรียกว่า The second Petukhov equation คือ

$$Nu = \frac{(f/8)RePr}{1.07+12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \frac{2}{(Pr^3-1)}} \quad (0.5 \leq Pr \leq 2000, 10000 < Re < 5000000) \quad (3.38)$$

สมการ Gnielinski ซึ่งได้ปรับปรุงเพิ่มเติมให้สมการมีความแม่นยำตรง ใช้คำนวณได้ดีกว่าสมการอื่น ที่เลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 10000 คือ

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \frac{2}{(Pr^3-1)}} \quad (0.5 \leq Pr \leq 2000, 3000 < Re < 5000000) \quad (3.39)$$

โดยตัวประกอบเสียดทาน  $f$  หาได้จาก the first Petukhov equation สมการ (3.9)

### 3.6 สมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Performance)

สมรรถนะเชิงความร้อนสามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (3.40)$$

เมื่อ  $\eta$  คือ สมรรถนะเชิงความร้อน

$Nu$  คือ เลขนซ์เซิลท์ของท่อกลมที่มีการใส่วงแหวนด้านใน

$Nu_0$  คือ เลขนซ์เซิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ

$f$  คือ ตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีการใส่วงแหวนด้านใน

$f_0$  คือ ตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ

## บทที่ 4

# การคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล

### 4.1 บทนำ

การจำลองการถ่ายเทความร้อนและสภาวะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านวงแหวนแบบต่างๆ นอกจากความเข้าใจทางทฤษฎีพื้นฐาน ยังต้องมีความเข้าใจทางด้านกรคำนวณเชิงตัวเลขเนื่องจากเป็นเครื่องมือหลักสำหรับการหาผลเฉลย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ หัวข้อ 4.2 กล่าวถึงวิวัฒนาการโดยย่อของวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข หัวข้อ 4.3 กล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล ซึ่งเป็นแนวทางที่ใช้โดยทั่วไป หัวข้อ 4.4 อธิบายคุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์หาความผิดพลาดของสมการดิสครีทไทต์ หัวข้อ 4.5 กล่าวถึงรูปแบบการจัดวางกริด, ความหมายของตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในบทนี้ หัวข้อ 4.6 จะกล่าวถึงการดิสครีทไทต์สมการอนุพันธ์พลังงานและหัวข้อ 4.7 กล่าวถึงการดิสครีทไทต์สมการนาเวียร์-สโตกส์

### 4.2 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

วิวัฒนาการของการคำนวณเชิงตัวเลขเริ่มมาก่อนปี ค.ศ. 1950 เกิดขึ้นพร้อมกับยุคที่ระบบคอมพิวเตอร์เริ่มมีการพัฒนา ช่วงเวลานั้นระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference methods, FDM) และระเบียบวิธีผลต่างมูลฐาน (Finite element methods, FEM) เป็นวิธีพื้นฐานในการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations, PDE) ซึ่งนิยมใช้มากในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics, CFD) ต่อมาได้มีการรวบรวมความรู้ทางระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องและระเบียบวิธีผลต่างมูลฐานเข้าด้วยกันเรียกว่า ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume methods, FVM) ทำให้มีโครงสร้างที่เข้าใจได้ง่ายขึ้นและมีความแม่นยำสูง จนเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

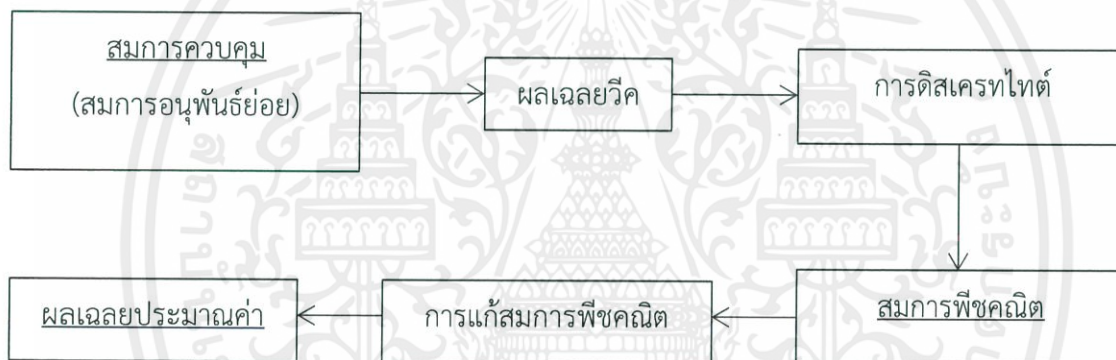
### 4.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

หากพิจารณาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในมุมมองการใช้โปรแกรม จะกล่าวได้ว่าเป็นโครงสร้างของอัลกอริทึมที่สามารถนำไปสู่การจำลองสภาวะการไหลได้ โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในเชิงพาณิชย์ ส่วนมากมีระบบที่ให้ผู้ใช้งานป้อนค่าต่างๆที่ต้องการแล้วจึงนำไปคำนวณ โดยแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

### 4.3.1 ขั้นก่อนประมวลผล

ขั้นก่อนประมวลผล (Pre-processing) คือ ขั้นตอนเตรียมการ โดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหาและพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. การกำหนดสนามการคำนวณ (Computation domain) หมายถึง การกำหนดรูปร่างและระบุนขนาดของระบบที่สนใจ
2. กำหนดจำนวนและรูปแบบการจัดวางกริด (Grid or Mesh) ซึ่งคือการแบ่งสนามการคำนวณออกเป็นปริมาตรเล็กๆ รูปแบบของการจัดวางกริด ขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณา การจัดที่เหมาะสมทำให้การหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximation solution) มีค่าแม่นยำขึ้น
3. เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมกับปัญหา โดยใช้องค์ความรู้ทางทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง
4. กำหนดคุณสมบัติของของไหล เช่น พิจารณาของไหลเป็นอากาศที่อุณหภูมิปกติ เป็นต้น
5. กำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) และค่าเริ่มต้น (Initial condition)



รูปที่ 4.1 ความเชื่อมโยงของกระบวนการดิสcretไทต์และผลเฉลยประมาณค่า

### 4.3.2 ขั้นประมวลผล

ขั้นประมวลผล (Solving) เป็นขั้นที่ต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งการคำนวณในงานวิจัยนี้ทั้งหมดใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยมีขั้นตอนดังนี้ (จากรูปที่ 4.1)

1. ประมาณตัวแปรไม่ทราบค่าโหนดค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันซึ่งมักใช้ในปัญหาแบบป็นป่วน สร้างเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย โดยรวมกับสมการควบคุมการไหล
2. หาผลเฉลยวีค (Weak solution) ของสมการควบคุมด้วยวิธีน้ำหนักตกค้าง (Weight residual) จากนั้นดิสcretไทต์ โดยประมาณแต่ละเทอมความสัมพันธ์ด้วยแบบแผนวิธีที่เลือกไว้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นสมการพีชคณิต
3. แก้สมการพีชคณิต ผลเฉลยที่ได้เรียกว่า ผลเฉลยประมาณค่า

### 4.3.3 ชั้นแสดงผล

ชั้นแสดงผล (Post-processing) คือการแสดงผลเฉลยประมาณค่าของตัวแปรที่สนใจและใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ เช่น รูปแบบความเร็ว รูปแบบวอร์เทกซิตี เป็นต้น

## 4.4 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติ ควรตระหนักว่าธรรมชาติมักมีพฤติกรรมซับซ้อน ดังนั้นสิ่งที่พึงระวังอย่างยิ่งคือ ความถูกต้องของผลเฉลย ผลการคำนวณที่ดีเลิศ เป็นเพียงค่าประมาณที่ดีที่สุดเท่าที่มนุษย์สามารถหาคำตอบได้เท่านั้น ไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรง

คุณสมบัติของวิธีการคำนวณ คือปัจจัยบ่งบอกความเที่ยงตรงของผลเฉลยประมาณค่า เมื่อเทียบกับพฤติกรรมจริงที่ควรเกิดขึ้น แบ่งได้หลายประการดังนี้

### 4.4.1 ความเข้ากันได้

ความเข้ากันได้ (Consistency) หมายถึงความเหมือน (Equivalent) ระหว่างสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย) และสมการพีชคณิตที่ผ่านกระบวนการดิสครีไทต์ เมื่อระยะกริด (Grid spacing) และค่าขั้นเวลา (Time step) ลดลงใกล้ศูนย์ โดยปกติเรียกความแตกต่างหลังจากกระบวนการดิสครีไทต์ว่า ความผิดพลาดแบบทรานเคชัน (Truncation error) ซึ่งลดลงเมื่อมีความเข้ากันได้มากขึ้น

### 4.4.2 เสถียรภาพการคำนวณ

เสถียรภาพการคำนวณ (Stability) เป็นลักษณะการคำนวณที่มีค่าผิดพลาดน้อยลงเมื่อคำนวณซ้ำ (Damping of error) เรียกความผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณซ้ำว่าความผิดพลาดแบบเร้าออฟ (Round-off error) เช่นความผิดพลาดในการคำนวณทศนิยมตำแหน่งที่ 12 ของคอมพิวเตอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากวิธีการคำนวณไม่มเสถียรภาพ ผลการคำนวณอาจมีลักษณะลู่ออก (Divergence) โดยมักเกิดจากการเลือกแบบจำลองคณิตศาสตร์ไม่ถูกต้องหรือแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขไม่เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา ซึ่งการตรวจสอบเสถียรภาพการคำนวณต้องใช้ความรู้ของทฤษฎีการรบกวน (Perturbation theory) เป็นแนวทาง

### 4.4.3 การลู่เข้าของผลเฉลย

ผลการคำนวณที่มีการลู่เข้าของผลเฉลย (Convergence) หมายถึงผลเฉลยประมาณค่ามีแนวโน้มเข้าใกล้ผลเฉลยแม่นยำตรง สำหรับปัญหาไม่เชิงเส้น (Nonlinear problem) ยากที่จะตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลย เนื่องจากไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ อย่างไรก็ตามการตรวจสอบทำได้ด้วยวิธีเปรียบเทียบผลการคำนวณที่มีระยะกริดลดลง กระทั่งผลเฉลยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะกริด (Grid independent) เรียกได้ว่ามีคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลยที่ดี

#### 4.4.4 การอนุรักษ์

คุณสมบัติการอนุรักษ์ (Conservation) เป็นคุณสมบัติที่มีอยู่ในกฎการอนุรักษ์ เนื่องจากผลการคำนวณที่มาจากสมการควบคุม ดังนั้นวิธีการคำนวณจึงควรมีคุณสมบัตินี้ด้วย โดยคุณสมบัติการอนุรักษ์เป็นจุดเด่นที่สำคัญของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม กล่าวคือคำนึงถึงความสมดุลของการส่งถ่ายปริมาณข้ามขอบเขตที่พิจารณา เช่น รอบผิวปิดซึ่งปริมาตรเล็กๆที่แบ่งตามระยะกริด เป็นต้น

#### 4.4.5 ความจำกัดขอบ

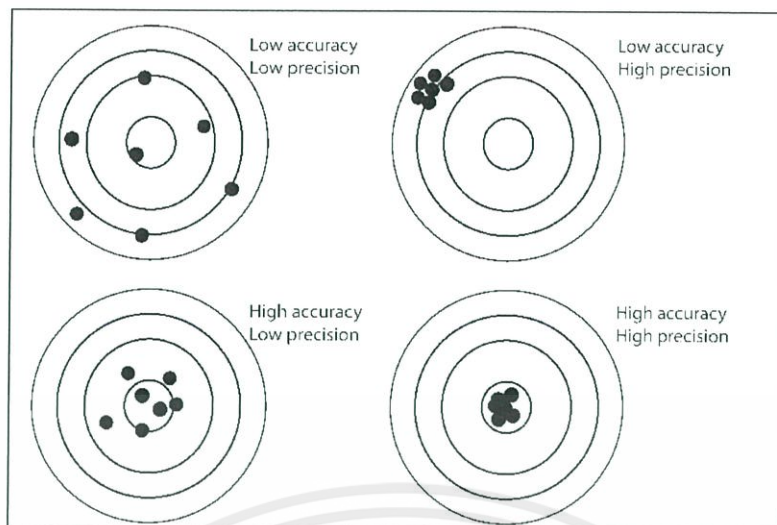
ความจำกัดขอบ (Boundedness) หมายถึงผลเฉลยควรมีค่าอยู่ในขอบเขตจำกัด เช่น ความหนาแน่น ความเข้มข้น ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ หรือระบบการถ่ายเทความร้อนที่ทราบอุณหภูมิต่ำสุด-สูงสุด ผลเฉลยที่ได้ควรมีค่าอยู่ในช่วงนั้นด้วยเช่นกัน โดยวิธีการคำนวณที่มีอันดับสูง (Higher order) มีแนวโน้มความจำกัดขอบต่ำลง ดังนั้นจึงไม่ควรเลือกใช้วิธีการคำนวณที่มีอันดับสูงมากเกินไปจนความจำเป็น

#### 4.4.6 ความเสมือนจริง

ความเสมือนจริง (Realizability) หมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จำลองพฤติกรรมธรรมชาติที่ซับซ้อน เช่น แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน แบบจำลองการเผาไหม้ เป็นต้น ควรเลือกแบบจำลองที่มีความเสมือนจริงเมื่อเทียบกับความหมายทางกายภาพ หากเลือกใช้หรือนำมาใช้ไม่สอดคล้องกับปัญหา ผลเฉลยที่ได้อาจไม่สื่อความหมายทางกายภาพที่ถูกต้อง

#### 4.4.7 ความแม่นยำ

บ่อยครั้งในทางวิศวกรรมกล่าวถึงความแม่นยำ (Accuracy) ซึ่งมักใช้สับสนกับความแม่นยำ (Precision) พิจารณารูปที่ 4.2 แสดงความแตกต่างระหว่างแนวคิดทั้งสองอย่างชัดเจน ตรงกลางเป้าเป็นเสมือนค่าแม่นยำ โดยเห็นได้ว่าความแม่นยำสูงหมายถึงค่าเฉลี่ยไม่ต่างจากค่าแม่นยำและความแม่นยำสูงหมายถึงค่าส่วนใหญ่กระจายตัวน้อย ดังนั้นงานวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมจึงควรให้ความสำคัญกับความแม่นยำมากกว่าความแม่นยำ ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์ที่ได้ถูกต้อง มีแนวโน้มเดียวกับสภาพความจริงมากขึ้น แต่ในงานออกแบบต้องการความผิดพลาดน้อยที่สุด จึงควรใช้ทั้ง 2 แนวคิดประกอบรวมกัน



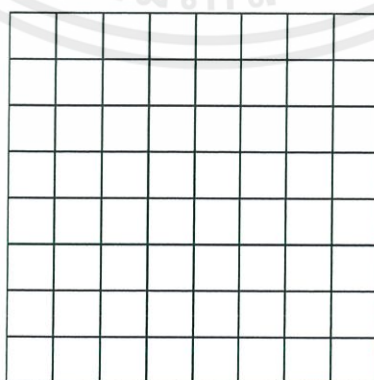
รูปที่ 4.2 แนวคิดของความแม่นยำและความเที่ยง

วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล แบ่งปัจจัยของความแม่นยำได้เป็น 3 ปัจจัยดังนี้

1. ความแม่นยำจากแบบจำลอง (Modeling accuracy) เกิดจากความเหมือนจริงของแบบจำลองเทียบกับพฤติกรรมความจริงตามธรรมชาติ
2. ความแม่นยำจากการดิสครีทไทต์ (Discretization accuracy) เกิดจากความเข้ากันได้ของสมการพีชคณิตเทียบกับสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย)
3. ความแม่นยำจากการแก้สมการพีชคณิต (Iteration accuracy) เกิดจากการลู่ออกของผลเฉลยประมาณค่าเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการพีชคณิต

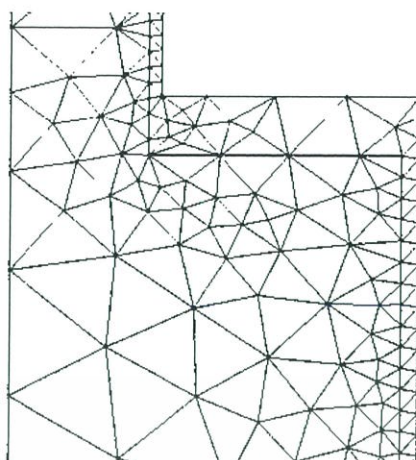
#### 4.5 รูปแบบการจัดวางกริด

รูปแบบการจัดวางกริดโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ แบบโครงสร้างปกติ (Structured grids) แบบกลุ่มโครงสร้าง (Block structured grid) และแบบไม่เป็นโครงสร้าง (Unstructured grids) เพื่อความกระชับได้ดิสครีทไทต์กริด 2 มิติเท่านั้น ซึ่งสามารถขยายไปสู่กริดแบบ 3 มิติได้โดยตรง

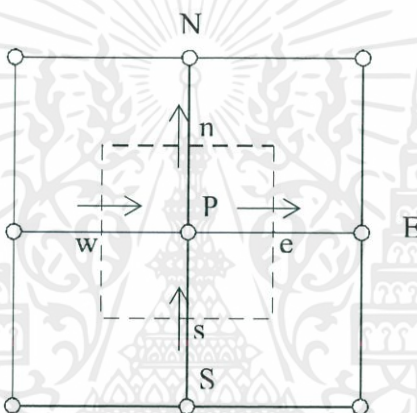


รูปที่ 4.3 การจัดวางกริดแบบโครงสร้างปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การจัดวางกริดแบบไม่เป็นโครงสร้าง



รูปที่ 4.5 ส่วนแรเงาแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ

จากรูปที่ 4.5 ตำแหน่ง P คือตำแหน่งโนด (Node) ที่สนใจ ตัวอักษรพิมพ์เล็กเช่น w, e แสดงถึงตำแหน่งของปริมาณที่เข้า-ออกจากปริมาตรควบคุมที่แรเงา (Cell volume) เช่น ความเร็ว เป็นต้น เรียกว่า ตำแหน่งผิวเซลล์ (Cell face) ลูกศรที่ปรากฏแสดงทิศเป็นบวกของปริมาณเวกเตอร์ที่ตำแหน่งผิวเซลล์ รูปแบบลักษณะนี้เรียกว่า การจัดเรียงแบบตำแหน่งร่วม (Co-located arrangement) กล่าวคือ ปริมาณสเกลาร์และเวกเตอร์มีตำแหน่งเดียวกัน (มวล ความเร็ว ความดันและอุณหภูมิ) โดยการจัดวางกริดในแบบอื่นจะได้กล่าวถึงในหัวข้อ 4.7 เนื่องมาจากปัญหาการดิสเครทไทซ์เทอมอัตราเปลี่ยนแปลงความดันของสมการนาเวียร์-สโตกส์

#### 4.6 การดิสเครทไทซ์สมการอนุรักษ์พลังงาน

การดิสเครทไทซ์สมการอนุรักษ์พลังงาน โดยไม่พิจารณาเทอมเทือดหาย สามารถเขียนได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\underbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \right) dt}_{\text{เทอมไม่คงตัว}} + \underbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt}_{\text{เทอมการพา}} = \underbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left( \int k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} dV \right) dt}_{\text{เทอมการแพร่}} \quad (4.1)$$

เนื่องจากสมการอนุรักษ์พลังงานมีตัวแปรขึ้นกับตำแหน่งและเวลา ดังนั้นสมการ (4.1) จึงอินทิเกรตในช่วงเวลาสั้นๆ ( $\Delta t$ ) และปริมาตรเล็กๆ ( $dV$ ) โดยแบ่งพิจารณาเป็น 3 เทอมตามความหมายทางกายภาพ คือ เทอมไม่คงตัว (Unsteady term) เทอมการพา (Convection term) และ เทอมการแพร่ (Diffusion term) ดังต่อไปนี้

#### 4.6.1 การดิสcretize เทอมไม่คงตัว

แนวทางการดิสcretize จะใช้ทฤษฎีของเกาส์ เพื่อพิจารณา (กรณีนี้คืออนุหภูมิ) ที่ส่งถ่ายเข้า-ออก จากขอบเขตของปริมาตรควบคุมเล็กๆ ดังนี้

$$\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \right) dt = \int \left( \int_t^{t+\Delta t} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \right) dV \quad (4.2)$$

การประมาณค่าผลต่างเวลาแบ่งได้เป็น 3 แบบแผนวิธีหลักๆ คือ แบบแผนวิธีเอกซ์พลีซิท (Explicit scheme) แบบแผนวิธีอิมพลีซิท (Implicit scheme) และแบบแผนวิธีแครง-นิโคลสัน (Crank-Nicolson scheme) งานวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะแบบแผนวิธีอิมพลีซิทซึ่งแบ่งได้หลายอันดับโดยสมการ (4.3) แสดงแบบแผนวิธีอิมพลีซิทอันดับหนึ่ง (First order implicit scheme) และ สมการ (4.4) แสดงแบบแผนวิธีอิมพลีซิทอันดับสอง (Second order implicit scheme)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $n$  แทนเวลาช่วงเวลาที่พิจารณา ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแสดงเฉพาะการดิสcretize ด้วยแบบแผนวิธีอิมพลีซิทอันดับหนึ่ง โดยนำสมการ (4.3) แทนในสมการ (4.2) (กรณี 2 มิติและจัดวางกริดตามรูปที่ 4.5) พิจารณาใน 2 มิติ ปริมาตรเซลล์เปลี่ยนเป็นพื้นที่เซลล์ จะได้ว่า

$$\int \left( \int_t^{t+\Delta t} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \right) dV = \rho c_p \left( \frac{T - T^0}{\Delta t} \Delta t \right) A_p$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \right) dt = \rho c_p (T - T^0) A_p \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (4.5) ด้วย '0' แทนอุณหภูมิที่เวลา  $t$  สำหรับอุณหภูมิที่เวลา  $t+\Delta t$  ไม่มีตัวยกและ  $A_p$  แทนพื้นที่เซลล์ที่ตำแหน่งโนด P (โนดที่สนใจ) เช่น  $A_p$  คือพื้นที่ส่วนที่แรเงาในรูปที่ 4.5 เป็นต้น

#### 4.6.2 การดิสcretize การพา

การดิสcretize ไปด้วยทฤษฎีของเกาส์ (พิจารณาใน 2 มิติและจัดวางกริดตามรูปที่ 4.5) สามารถเขียนได้ดังนี้ เมื่อ  $F_x = \rho c_p u_x L_x$  คือสัมประสิทธิ์การพาที่ผนังเซลล์ต่างๆ โดยที่  $x = e, w, n, s$  ตามลำดับ

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt &= \int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho c_p \bar{u}_i T dA \right) dt \\ &= \rho c_p \left( (uTL)_e - (uTL)_w + (uTL)_n - (uTL)_s \right) \Delta t \\ \int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt &= (F_e T_e - F_w T_w + F_n T_n - F_s T_s) \Delta t \end{aligned} \quad (4.6)$$

ค่าอุณหภูมิที่ผิวเซลล์ เช่น  $T_e$  คืออุณหภูมิที่ผิวเซลล์  $e$  (ของปริมาตรที่โนด P) เป็นต้น คือตัวแปรไม่ทราบค่าที่ต้องการประมาณค่า ใช้แบบแผนวิธีครอดราติกและจัดรูปสมการ (4.6) ใหม่จะได้สมการ (4.7) ดังนั้นผลเฉลยที่ได้จึงมีคุณสมบัติของแบบแผนครอดราติก ซึ่งถูกบรรจุอยู่ในพฤติกรรมกริดที่ส่งผลมาจากเทอมการพา ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้ว่าการเลือกแบบแผนวิธีการคำนวณในแต่ละเทอมมีความสำคัญมากต่อผลเฉลยประมาณค่าของระบบที่พิจารณา

$$\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt = \left[ \begin{array}{l} \frac{3}{8} T_p \left( (1 + \alpha_e) F_e - (2 - \alpha_w) F_w \right) \\ + (1 + \alpha_n) F_n - (2 - \alpha_s) F_s \\ - \frac{1}{8} T_w \left( 3(1 + \alpha_w) F_w \right) \\ + \alpha_e F_e \\ + \frac{1}{8} T_e \left( 3(2 - \alpha_e) F_e \right) \\ + (1 - \alpha_w) F_w \\ - \frac{1}{8} T_s \left( 3(1 + \alpha_s) F_s \right) \\ + \alpha_n F_n \\ + \frac{1}{8} T_n \left( 3(2 - \alpha_n) F_n \right) \\ + (1 - \alpha_s) F_s \\ + \frac{1}{8} T_{ww} (\alpha_w F_w) \\ - \frac{1}{8} T_{ee} ((1 - \alpha_e) F_e) \\ + \frac{1}{8} T_{ss} (\alpha_s F_s) \\ - \frac{1}{8} T_{nn} ((1 - \alpha_n) F_n) \end{array} \right] \Delta t \quad (4.7)$$

### 4.6.3 การดิสเครทไทต์เทอมการแพร่

การดิสเครทไทต์ด้วยทฤษฎีของเกาส์ (พิจารณา 2 มิติและจัดวางกริดตามรูปที่ 4.5) สามารถเขียนได้ดังสมการ (4.8)

การหาค่าประมาณของ  $\partial T / \partial x_i$  เลือกแสดงด้วยแบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง จะได้ดังสมการ (4.9) เมื่อ  $\delta_{PE}$  เป็นผลต่างของระยะที่โนด P และ E ในทำนองเดียวกัน  $\delta_{WP}$ ,  $\delta_{PN}$  และ  $\delta_{SP}$  ก็คือผลต่างของระยะระหว่างโนดตัวห้อย

$$\int_t^{t+\Delta t} \left( \int k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} dV \right) dt = \int_t^{t+\Delta t} \left( \int \bar{n} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) dA \right) dt \quad (4.8)$$

$$= \left( \begin{array}{l} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} L \right)_e - \left( k \frac{\partial T}{\partial x} L \right)_w \\ + \left( k \frac{\partial T}{\partial x} L \right)_n - \left( k \frac{\partial T}{\partial x} L \right)_s \end{array} \right) \Delta t$$

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e = \frac{(\phi_E - \phi_P)}{\delta_{PE}}, \quad \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w = \frac{(\phi_P - \phi_W)}{\delta_{WP}} \quad (4.9)$$

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n = \frac{(\phi_N - \phi_P)}{\delta_{PN}}, \quad \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s = \frac{(\phi_P - \phi_S)}{\delta_{SP}}$$

แทนสมการ (4.9) ลงในสมการ (4.8) พร้อมจัดรูปใหม่ จะได้ดังสมการ (4.10) เมื่อ  $D_e = k \frac{L_e}{\delta_{PE}}$ ,  $D_w = k \frac{L_w}{\delta_{WP}}$ ,  $D_n = k \frac{L_n}{\delta_{PN}}$  และ  $D_s = k \frac{L_s}{\delta_{SP}}$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ผนังเซลล์ e, w, n และ s ตามลำดับ

$$\int_t^{t+\Delta t} \left( \int k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} dV \right) dt = \left( \begin{array}{l} D_e T_E + D_w T_W \\ + D_n T_N + D_s T_S \\ -(D_e + D_w + D_n + D_s) T_P \end{array} \right) \Delta t \quad (4.10)$$

นำสมการ (4.5), (4.7) และ (4.10) แทนลงในสมการ (4.1) และจัดรูปใหม่ โดยรวมพจน์ต่างๆเข้าด้วยกัน จะได้สมการ (4.11) เรียกว่าสมการอนุรักษพลังงานแบบดิสเครทไทต์หรืออีกนัยหนึ่งคือ สมการพีชคณิตของสมการอนุรักษพลังงาน

$$\begin{aligned} a_P T_P &= a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S \\ &+ a_{EE} T_{EE} + a_{WW} T_{WW} \\ &+ a_{NN} T_{NN} + a_{SS} T_{SS} + a_P^0 T_P^0 \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned}
\text{เมื่อ } a_E &= D_e - \frac{3}{8}(2 - \alpha_e)F_e - \frac{1}{8}(1 - \alpha_w)F_w \\
a_W &= D_w + \frac{3}{8}(1 + \alpha_w)F_w + \frac{1}{8}\alpha_e F_e \\
a_N &= D_n - \frac{3}{8}(2 - \alpha_n)F_n - \frac{1}{8}(1 - \alpha_s)F_s \\
a_S &= D_s + \frac{3}{8}(1 + \alpha_s)F_s + \frac{1}{8}\alpha_n F_n \\
a_{EE} &= \frac{1}{8}(1 - \alpha_e)F_e \\
a_{WW} &= -\frac{1}{8}\alpha_w F_w \\
a_{NN} &= \frac{1}{8}(1 - \alpha_n)F_n \\
a_{SS} &= -\frac{1}{8}\alpha_s F_s \\
a_P^0 &= \frac{A_p}{\Delta t} \\
a_P &= a_P^0 + a_E + a_W + a_S + a_{EE} + a_{WW} + a_{NN} + a_{SS} \\
&\quad + (F_e - F_w + F_n - F_s)
\end{aligned}$$

#### 4.7 การดิสcretไทต์สมการนาเวียร์-สโตกส์

การดิสcretไทต์สมการนาเวียร์-สโตกส์แบบไร้การอัดตัว ได้ผลเฉลยวิคดังนี้

$$\begin{aligned}
&\underbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} dV \right) dt}_{\text{เทอมไม่คงตัว}} + \underbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dV \right) dt}_{\text{เทอมการพา}} \\
&= \underbrace{-\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \frac{\partial p}{\partial x_i} dV \right) dt}_{\text{เทอมอัตราเปลี่ยนความดัน}} + \underbrace{\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} dV \right) dt}_{\text{เทอมการแพร่}}
\end{aligned} \tag{4.12}$$

จากสมการ (4.12) พบว่าแต่ละเทอมมีความหมายคล้ายกับสมการอนุรักษ์พลังงานในหัวข้อ 4.6 สมการ (4.1) โดยสมการ (4.12) มีเทอมอัตราเปลี่ยนความดันอยู่ด้วย จากหลักการความคล้ายคลึง ทำให้ไม่ต้องกล่าวรายละเอียดการดิสcretไทต์เทอมไม่คงตัว เทอมการพาและเทอมการแพร่ซ้ำอีก อย่างไรก็ตามได้แสดงผลการดิสcretไทต์เทอมดังกล่าวไว้ สำหรับหัวข้อนี้ได้เพิ่มเติมเนื้อหาการดิสcretไทต์เทอมอัตราเปลี่ยนความดันเป็นหลัก

การดิสcretไทต์เทอมอัตราเปลี่ยนความดันมีลักษณะที่พิเศษกว่าเทอมอื่นเพราะว่าในระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องจะพิจารณาอัตราเปลี่ยนแปลงความดันเป็นเทอมแหล่งกำเนิด (Source term) เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ควบคู่กัน (Couple relation) ระหว่างสมการอนุรักษ์มวลและสมการนาเวียร์-สโตกส์ ด้วยตัวแปรความเร็ว อีกทั้งสมการนาเวียร์-สโตกส์ ยังมีความควบคู่แบบไม่เชิงเส้น (Non-linear couple)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมอยู่ด้วย เห็นได้จากทอมการพาเทียบกับทอมอื่นๆ ดังนั้นหากทราบค่าของความดันที่ถูกต้องแล้ว ผลเฉลยของสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบไร้การอัดตัว (ความเร็ว) ควรจะสอดคล้องกับสมการอนุกรมมวลด้วย

เมื่อพิจารณาทอมอัตราเปลี่ยนความดันเป็นทอมแหล่งกำเนิด ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีของเกาส์ในการดิสเครทไทต์ ดังนั้นสามารถเขียนได้ดังสมการ (4.13) ซึ่งวิธีการแบบนี้เป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้คุณสมบัติการเข้ากันได้ลดลง

$$\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \frac{\partial p}{\partial x_i} d\mathbf{v} \right) dt = \frac{\partial p}{\partial x_i} A_p \Delta t \quad (4.13)$$

สมการ (4.13) ทอมที่ต้องการประมาณค่าอัตราเปลี่ยนแปลงความดันคือ  $\partial p / \partial x_i$  ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดวางตำแหน่งของความดันบนกริด โดยที่ผ่านมากล่าวถึงการจัดวางกริดแบบตำแหน่งร่วมเท่านั้น โดยทั่วไปการจัดวางกริดสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

- (1) การจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วม (Co-located arrangement)
- (2) การจัดเรียงกริดแบบทับซ้อน (Staggered arrangement)

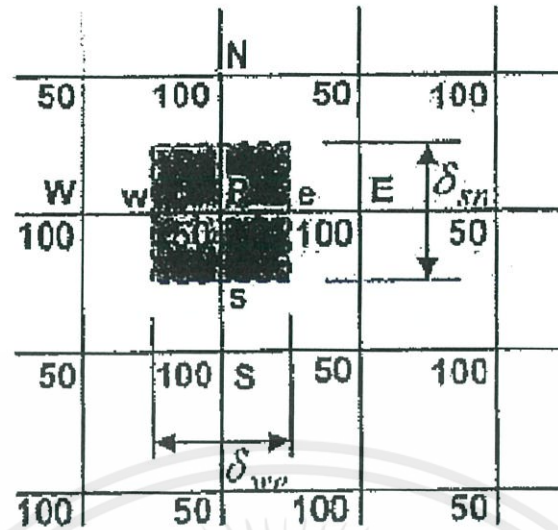
กรณีจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วม การประมาณค่า  $\partial p / \partial x_i$  แบบเชิงเส้นจะได้ดังนี้

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_e - p_w}{\delta_{we}} = \frac{\left( \frac{p_E + p_P}{2} \right) - \left( \frac{p_P + p_W}{2} \right)}{\delta_{we}} = \frac{p_E - p_W}{2\delta_{we}} \quad (4.14)$$

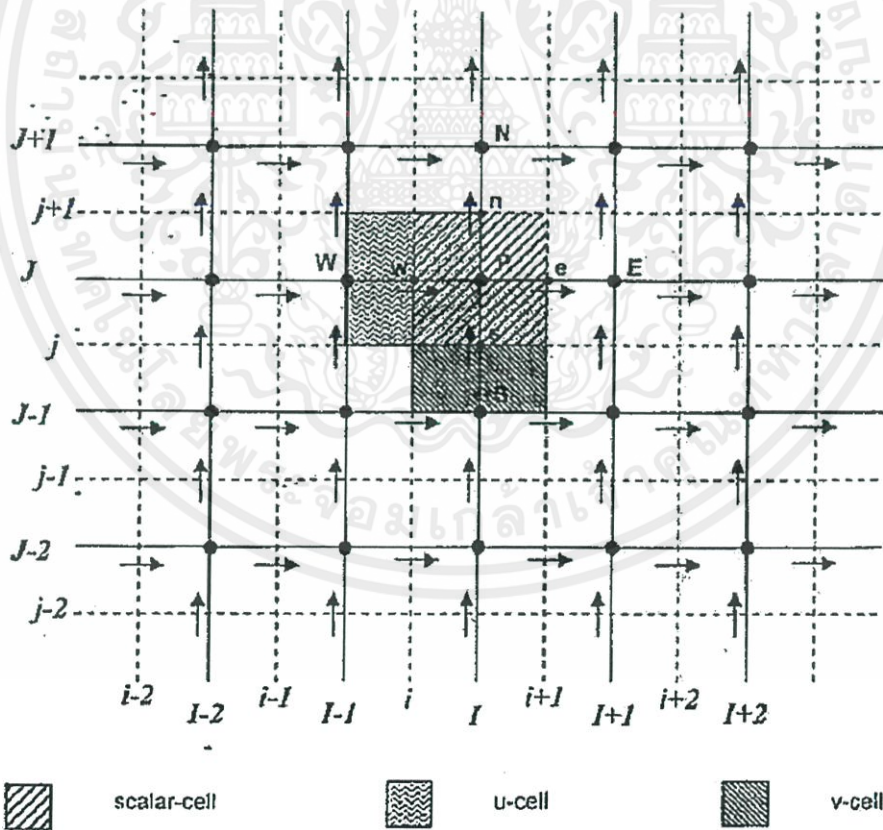
$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_n - p_s}{\delta_{sn}} = \frac{\left( \frac{p_N + p_P}{2} \right) - \left( \frac{p_P + p_S}{2} \right)}{\delta_{sn}} = \frac{p_N - p_S}{2\delta_{sn}}$$

การประมาณอัตราเปลี่ยนแปลงความดันสมการ (4.14) ใช้ได้ดีในปัญหาที่การกระจายตัวของความดันสม่ำเสมอ หากการกระจายตัวของความดันเปลี่ยนแปลงไปมากหรือเกิดพฤติกรรมความดันกระเพื่อม (Pressure fluctuation) ดังในรูปที่ 4.6 เรียกว่า ปัญหากระดานหมากรุก (Checker-board problem) การประมาณค่าที่มีการจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วมจะไม่เหมาะสม

แทนค่าจากปัญหากระดานหมากรุกตามรูปที่ 4.6 ในสมการ (4.14) พบว่าอัตราเปลี่ยนของความดันเป็นศูนย์ ซึ่งไม่เป็นจริง กรณีนี้สามารถแก้ไขได้โดยลดระยะกริดจนไม่เกิดลักษณะปัญหากระดานหมากรุก แต่ทำให้จำนวนกริดเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้สิ้นเปลืองหน่วยความจำและระยะเวลาในการคำนวณ ซึ่งขึ้นอยู่กับทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ที่มี



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของความดันกระเพื่อมหรือปัญหากระดานหมากรุก



รูปที่ 4.7 การจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนในสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อน จึงเป็นเทคนิคที่เกิดขึ้นเพื่อแก้ไขความผิดพลาดของการคำนวณค่าอัตราเปลี่ยนความดันในปัญหากระดานหมากรุก โดยให้ตัวแปรสเกลาร์ (มวล ความดันและอุณหภูมิ) อยู่ที่ตำแหน่งโนดของปริมาตรควบคุมที่พิจารณา แต่ตัวแปรเวกเตอร์ (ความเร็ว) มีปริมาตรควบคุมเบี่ยงออกไป โดยจุดศูนย์กลางเซลล์ของปริมาตรเบี่ยงอยู่บนผิวเซลล์ของปริมาตรควบคุมที่สนใจ ในกรณี 2 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 4.7

รูปที่ 4.7 ปริมาณสเกลาร์เก็บค่าที่โนดที่มีเครื่องหมาย (•) เรียกปริมาตรควบคุมนั้นว่าสเกลาร์เซลล์ (Scalar-cell) สำหรับปริมาณเวกเตอร์เก็บค่าอยู่ที่ผิวเซลล์ที่มีเครื่องหมาย  $\rightarrow$  เรียกว่า ยูเซลล์ (U-cell) ใช้กับแนวนอน กรณีแนวตั้งเก็บค่าอยู่ที่ผิวเซลล์ที่มีเครื่องหมาย  $\uparrow$  เรียกว่า วีเซลล์ (V-cell) โดยการจัดคู่อันดับของตำแหน่งใช้สัญลักษณ์ตัวพิมพ์ใหญ่ (I, J) แทนตำแหน่งของโนดที่อ้างอิงสเกลาร์เซลล์และตัวพิมพ์เล็ก (i, j) แทนตำแหน่งของผิวเซลล์ ใช้ประกอบกับตัวพิมพ์ใหญ่เพื่ออ้างอิงตำแหน่งของยูเซลล์และวีเซลล์ที่เบี่ยงไปตามลำดับ

จากสมการ (4.13) การประมาณค่า  $\partial p / \partial x_i$  กรณีจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนจะเปลี่ยนไปจากสมการ (4.14) เพราะพิจารณาอัตราเปลี่ยนของความดันที่ปริมาตรควบคุมของความเร็ว ในกรณีอัตราเปลี่ยนความดันตามแนวนอน ( $\partial p / \partial x$ ) ใช้ยูเซลล์และแนวตั้ง ( $\partial p / \partial y$ ) ใช้วีเซลล์ ดังสมการ (4.15) และ (4.16) เป็นการประมาณค่าแบบเชิงเส้น โดยสมการทั้งสองอ้างอิงตำแหน่งแบบคู่อันดับ

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_P - p_W}{\delta_{WP}} = \frac{p_{I,J} - p_{I-1,J}}{\delta_u} \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_P - p_S}{\delta_{SP}} = \frac{p_{I,J} - p_{I,J-1}}{\delta_v} \quad (4.16)$$

เมื่อ  $\delta_u$  และ  $\delta_v$  คือระยะความกว้างของผิวเซลล์ยูเซลล์และวีเซลล์ตามลำดับ พิจารณาในปัญหากระดานหมากรุกด้วยสมการ (4.15) และ (4.16) พบว่าค่าอัตราเปลี่ยนของความดันมีค่าไม่เป็นศูนย์ แสดงว่าการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนมีแนวโน้มที่ใช้ปริมาณกริดไม่มาก แต่สามารถคำนวณอัตราเปลี่ยนของความดันได้ถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนต้องจัดเก็บตำแหน่งยูเซลล์และวีเซลล์แยกออกจากตำแหน่งสเกลาร์เซลล์ จึงทำให้ค่อนข้างยุ่งยากในการเขียนโปรแกรมคำนวณ

ดังนั้นการประมาณค่าเทอมอัตราเปลี่ยนความดันในสมการ (4.12) กรณีจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนทำได้โดยแทนสมการ (4.15) และ (4.16) ในสมการ (4.13) จัดรูปใหม่ได้

$$\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \frac{\partial p}{\partial x_i} dV \right) dt = \begin{cases} (p_{I,J} - p_{I-1,J}) L_u \Delta t & ; u - \text{cell} \\ (p_{I,J} - p_{I,J-1}) L_v \Delta t & ; v - \text{cell} \end{cases} \quad (4.17)$$

เมื่อ  $L_u = L_{i,j}$  และ  $L_v = L_{i,j}$  เป็นระยะความกว้าง-ยาวของยูเซลและวีเซลตามลำดับ จากสมการ (4.17) ใช้ในกรณีกริดชนิดสี่เหลี่ยมเหมือนดังรูปที่ 4.7 เท่านั้น ไม่ครอบคลุมกริดที่มีรูปแบบอื่นๆ เช่น สามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น

เมื่อพิจารณาการ discretize ไฟล์สมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยใช้หลักการของความคล้ายคลึง จากการ discretize ไฟล์ของสมการอนุรักษ์พลังงาน สมการ (4.12) โดยจัดรูปใหม่และเขียนได้ดังสมการ (4.18) และ (4.19) ซึ่งเป็นสมการนาเวียร์-สโตกส์ในแนวนอนและแนวตั้งตามลำดับ

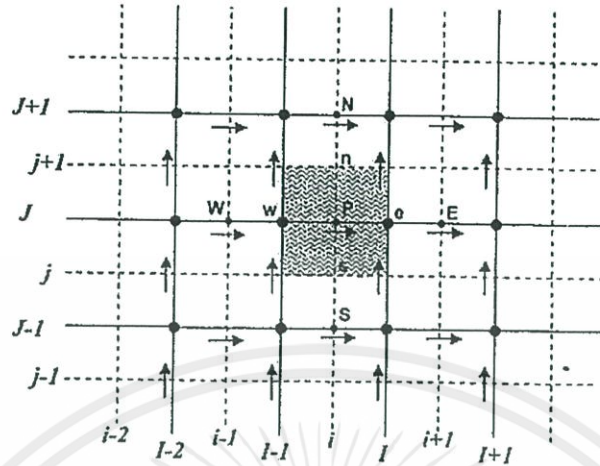
$$\begin{aligned} a_p u_p &= a_E u_E + a_W u_W + a_N u_N + a_S u_S \\ &\quad + a_{EE} u_{EE} + a_{WW} u_{WW} \\ &\quad + a_{NN} u_{NN} + a_{SS} u_{SS} \\ &\quad + a_p^0 u_p^0 + (p_W - p_P) L_u \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} a_p v_p &= a_E v_E + a_W v_W + a_N v_N + a_S v_S \\ &\quad + a_{EE} v_{EE} + a_{WW} v_{WW} \\ &\quad + a_{NN} v_{NN} + a_{SS} v_{SS} \\ &\quad + a_p^0 v_p^0 + (p_S - p_P) L_v \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } a_E &= D_e - \frac{3}{8}(2 - \alpha_e)F_e - \frac{1}{8}(1 - \alpha_w)F_w \\ a_W &= D_w + \frac{3}{8}(1 + \alpha_w)F_w + \frac{1}{8}\alpha_e F_e \\ a_N &= D_n - \frac{3}{8}(2 - \alpha_n)F_n - \frac{1}{8}(1 - \alpha_s)F_s \\ a_S &= D_s + \frac{3}{8}(1 + \alpha_s)F_s + \frac{1}{8}\alpha_n F_n \\ a_{EE} &= \frac{1}{8}(1 - \alpha_e)F_e \\ a_{WW} &= -\frac{1}{8}\alpha_w F_w \\ a_{NN} &= \frac{1}{8}(1 - \alpha_n)F_n \\ a_{SS} &= -\frac{1}{8}\alpha_s F_s \\ a_p^0 &= \frac{A_p}{\Delta t} \\ a_p &= a_p^0 + a_E + a_W + a_S + a_{EE} + a_{WW} + a_{NN} + a_{SS} \\ &\quad + (F_e - F_w + F_n - F_s) \end{aligned}$$

สมการ (4.18) และ (4.19) เขียนอยู่ในรูปการจัดวางกริดแบบทับซ้อน ดังนั้นจากหัวข้อที่ผ่านมา ปริมาณ  $F, D$  เขียนอยู่ในรูปแบบของการจัดวางกริดแบบตำแหน่งร่วม จึงต้องปรับปรุง โดยพิจารณากรณี ยูเซลและวีเซลตามลำดับดังนี้

## (1) สัมประสิทธิ์การพาและการแพร่กรณียูเซล



รูปที่ 4.8 เวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาเยล

จากรูปที่ 4.8 แสดงความเร็วในผนังเซลล์แบบต่างๆของยูเซลในระบบการกำหนดตำแหน่งแบบคู่ อันดับ พบว่าตำแหน่งเดิมของโนด P ในรูปที่ 4.7 เป็นตำแหน่งโนด e ในรูปที่ 4.8 เนื่องจากขณะที่พิจารณาเยลในกริดแบบทับซ้อน ตำแหน่งกึ่งกลางเซลล์เพียงเบนไปทำให้ต้องพิจารณาการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆอีกครั้ง

กรณีความหนาแน่นและความหนืดมีค่าคงที่ สามารถหาสัมประสิทธิ์การพาและการแพร่ได้ดังสมการ (4.20) และ (4.21) ตามลำดับ

$$F_e = (\rho u L)_e = \rho L_{I,J} \frac{u_{i+1,J} + u_{i,J}}{2}, \quad F_w = (\rho u L)_w = \rho L_{I-1,J} \frac{u_{i,J} + u_{i-1,J}}{2}, \quad (4.20)$$

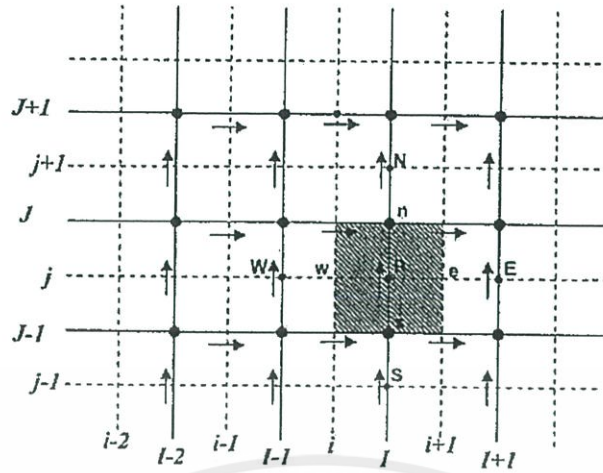
$$F_n = (\rho u L)_n = \rho L_{i,j+1} \frac{v_{I,j+1} + v_{I-1,j+1}}{2}, \quad F_s = (\rho u L)_s = \rho L_{i,j} \frac{v_{I,j} + v_{I-1,j}}{2},$$

$$D_e = \mu \frac{L_{I,J}}{x_{i+1} - x_i}, \quad D_w = \mu \frac{L_{I-1,J}}{x_i - x_{i-1}}, \quad (4.21)$$

$$D_n = \mu \frac{L_{i,j+1}}{y_{j+1} - y_j}, \quad D_s = \mu \frac{L_{i,j}}{y_j - y_{j-1}}$$

## (2) สัมประสิทธิ์การพาและการแพร่กรณีวีเซล

พบว่าตำแหน่งเดิมของโนด P ในรูปที่ 4.7 เป็นตำแหน่งโนด n ในรูปที่ 4.9 เนื่องจากตำแหน่งกึ่งกลางเซลล์เพียงเบนไป คล้ายคลึงกับกรณียูเซล โดยสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาและการแพร่ได้ดังสมการ (4.22) และ (4.23) ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 เวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาวิเซล

$$F_e = \rho L_{i+1,j-1} \frac{u_{i+1,j} + u_{i+1,j-1}}{2}, \quad F_w = \rho L_{i,j} \frac{u_{i,j} + u_{i,j-1}}{2}, \quad (4.22)$$

$$F_n = \rho L_{i,j} \frac{v_{i,j} + v_{i,j+1}}{2}, \quad F_s = \rho L_{i,j-1} \frac{v_{i,j-1} + v_{i,j}}{2}, \quad (4.23)$$

$$D_e = \mu \frac{L_{i+1,j-1}}{x_{i+1} - x_i}, \quad D_w = \mu \frac{L_{i,j}}{x_i - x_{i-1}}, \quad (4.23)$$

$$D_n = \mu \frac{L_{i,j}}{y_{j+1} - y_j}, \quad D_s = \mu \frac{L_{i,j-1}}{y_j - y_{j-1}}$$

พิจารณาสัมประสิทธิ์การพา ( $F = \rho u$ ) เมื่อเทียบกับการดิสเครทไทต์สมการอนุพันธ์พลังงานในหัวข้อ 4.6 จะพบว่าในหัวข้อที่ผ่านมา ไม่ต้องดิสเครทไทต์เทอมสัมประสิทธิ์ต่างๆ เนื่องจากในสมการอนุพันธ์พลังงานถือว่าทราบค่าความเร็วอยู่ เช่น ใช้ตำแหน่งโนด (กรณีกริดแบบตำแหน่งร่วม) หรือใช้ตำแหน่งยูเซล-วิเซล (กรณีกริดแบบทับซ้อน) เป็นต้น ดังในสมการ (4.20) ถึง (4.23)

กรณีจัดเรียงกริดแบบทับซ้อน ควรเขียนสมการดิสเครทไทต์ในระบบตำแหน่งคู่อันดับ เพื่อไม่ทำให้ตำแหน่งของปริมาตรควบคุมที่พิจารณาสับสน จากสมการ (4.17), (4.18) และ (4.19) นำมาเขียนใหม่เป็นสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบดิสเครทไทต์ได้ดังนี้

$$a_{i,j} u_{i,j} = \sum a_d u_d (p_{i-1,j} - p_{i,j}) L_{i,j} \quad (4.24)$$

$$a_{i,j} v_{i,j} = \sum a_d v_d (p_{i,j-1} - p_{i,j}) L_{i,j} \quad (4.25)$$

เมื่อตัวห้อย  $d$  แทนตำแหน่งต่างๆของผิวเซลในปริมาตรควบคุมที่พิจารณา โดยเทียบกับกลุ่มสัมพันธ์ในสมการ (4.18) และ (4.19) เช่นตำแหน่งผิวเซล P, E, W, N, S และ EE เป็นต้น ซึ่งมีสัมพันธ์การพาและการแพร่เป็นไปตามสมการ (4.20) และ (4.23)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ

### 5.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้สำหรับการวิจัยและพร้อมทั้งทำการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลอง (Experiment result) ซึ่งลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนนี้เป็นท่อกลมที่ใส่วงแหวนเรียงรูปร่างต่างๆภายในท่อดังรูปที่ 5.1 โดยมีอัตราส่วนการบล็อก (Blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 อัตราส่วนพิตช์ (Pitch ratio, PR) เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และมุมปะทะ (Attack angle) เท่ากับ 45 องศา



รูปที่ 5.1 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวน

### 5.2 สมการควบคุมและสมมติฐาน

การพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม ได้มีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- การไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- ของไหลทดสอบอัดตัวไม่ได้
- คุณสมบัติของของไหลคงที่
- ไม่คำนึงถึงแรงเนื่องจากน้ำหนักและการสูญเสียเนื่องจากความหนืด
- ไม่คำนึงถึงการแผ่รังสีความร้อน

จากสมมติฐานข้างต้น สำหรับการไหลในท่อกลม สมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน โดยสามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้ดังนี้

$$\text{สมการความต่อเนื่อง:} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \quad (5.1)$$

$$\text{สมการโมเมนตัม:} \quad \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (5.2)$$

$$\text{สมการพลังงาน:} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (5.3)$$

เมื่อ  $\Gamma$  คือ การแพร่ทางความร้อน กำหนดโดย  $\Gamma = \frac{\mu}{Pr}$

### 5.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

สำหรับการคำนวณในสามมิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

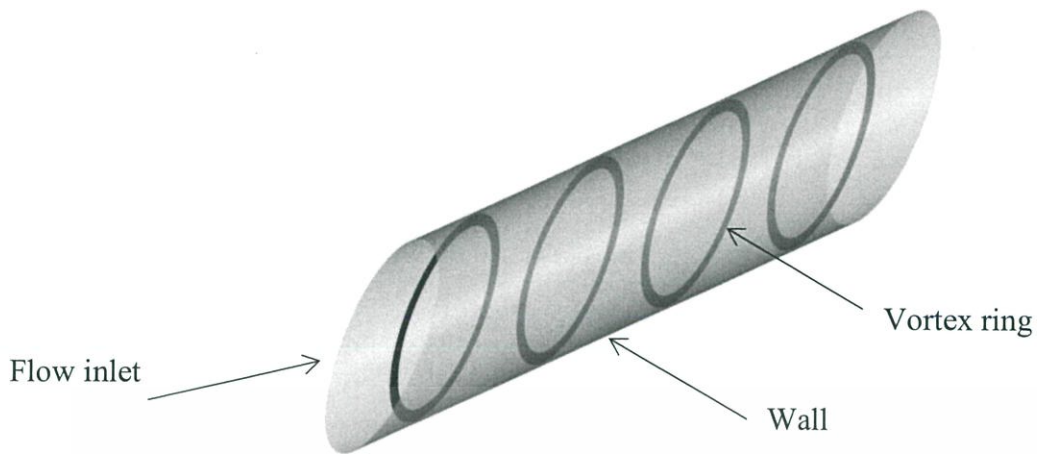
5.3.1 สภาวะทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translation อากาศไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลอย่างสม่ำเสมอและมีค่าเลขพรานด์เทิล (Prandtl number, Pr) คงที่เท่ากับ 0.707

5.3.2 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังความเร็วมีค่าเท่ากับศูนย์ (No slip condition) เป็นผนังที่อยู่กับที่ (Stationary wall)

5.3.3 กำหนดค่าฟลักซ์ความร้อนมีค่าเท่ากับ 600 วัตต์ต่อตารางเมตร

### 5.4 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลอง

ในการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลอง ในงานวิจัยนี้ได้นำผลที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรมไปเทียบกับผลจากการทดลอง Promvong et al. [5] ซึ่งเป็นการทดลองการไหลของของไหลผ่านท่อกลมที่ใสวงแหวนกลมเอียงภายในท่อ โดยการกำหนดเงื่อนไขให้เป็นกรณีเดียวกันกับการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า  $D = 0.05$  m และสมมติท่อยาวมาก ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นแบบ periodic ที่ทางเข้าและออก ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3 ในกรณีศึกษาต่างๆได้แสดงในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.2 แบบจำลองสามมิติของท่อกลมที่มีวงแหวนวortex ด้านใน



รูปที่ 5.3 แบบจำลองสามมิติของท่อกลมที่มีวงแหวนวortex ด้านในแบบ 1 โมดูล

รูปที่ 5.4 ลักษณะกริดอิสระที่ใช้ในการจำลองการไหลสามมิติ

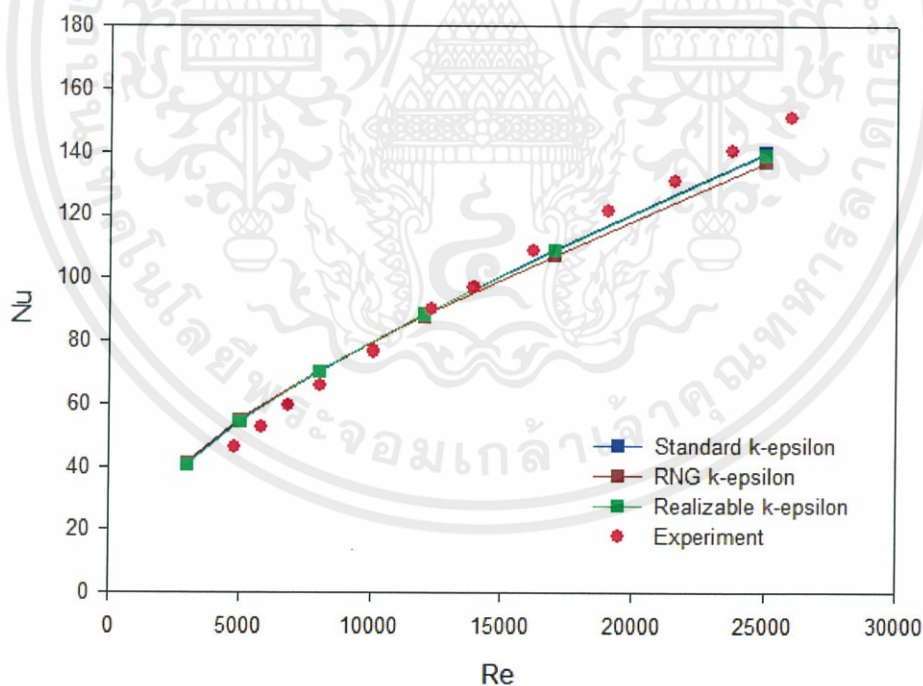
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริด

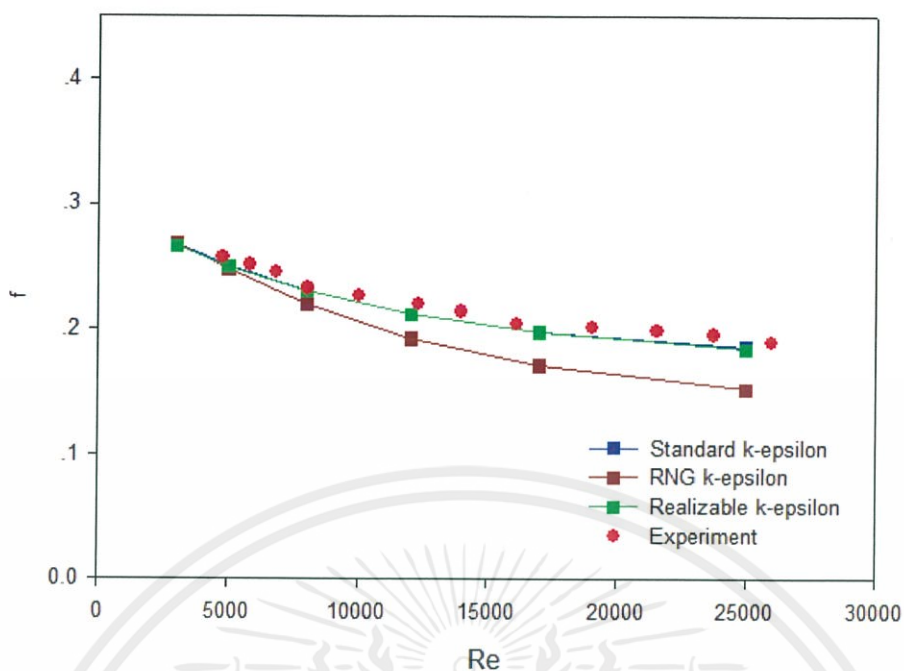
กริดที่ใช้สำหรับกรณีใส่วงแหวนเอียง ดังแสดงในรูปที่ 5.4 เป็นรูปร่างสี่เหลี่ยม แบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) คือ จะพิจารณาบริเวณที่เป็นวงแหวนให้มีจำนวนกริดหนาแน่นและบริเวณอื่นก็มีจำนวนกริดเบาบางลง ส่วนการหาผลกระทบบของกริดที่มีผลต่อคำตอบ ได้ทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณของกริดที่แตกต่างกัน ที่ประมาณ 100,000 และ 200,000 ใช้ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE และใช้แบบแผนวิธีผลต่างอันดับหนึ่ง เงื่อนไขการลู่เข้า หากคำตอบของทุกค่าอยู่ที่  $10^{-6}$  ยกเว้นสมการพลังงานซึ่งอยู่ที่  $10^{-9}$  พบว่าเมื่อจำนวนกริดเพิ่มขึ้นเป็น 200,000 ค่าเลขชี้เชิงเลขที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1 % ส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1 % เช่นกัน ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของกริดที่ประมาณ 200,000 ซึ่งปริมาณกริดนี้จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆต่อไป

#### 5.4.2 การตรวจสอบแบบจำลองการปั่นป่วน

ในการจำลองหาแบบจำลองการปั่นป่วนที่เหมาะสมได้ทำการจำลอง 3 แบบจำลอง คือ Standard k-epsilon, RNG k-epsilon และ Realizable k-epsilon พบว่าแบบจำลองที่ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง คือ Realizable k-epsilon ดังรูปที่ 5.5 และ 5.6



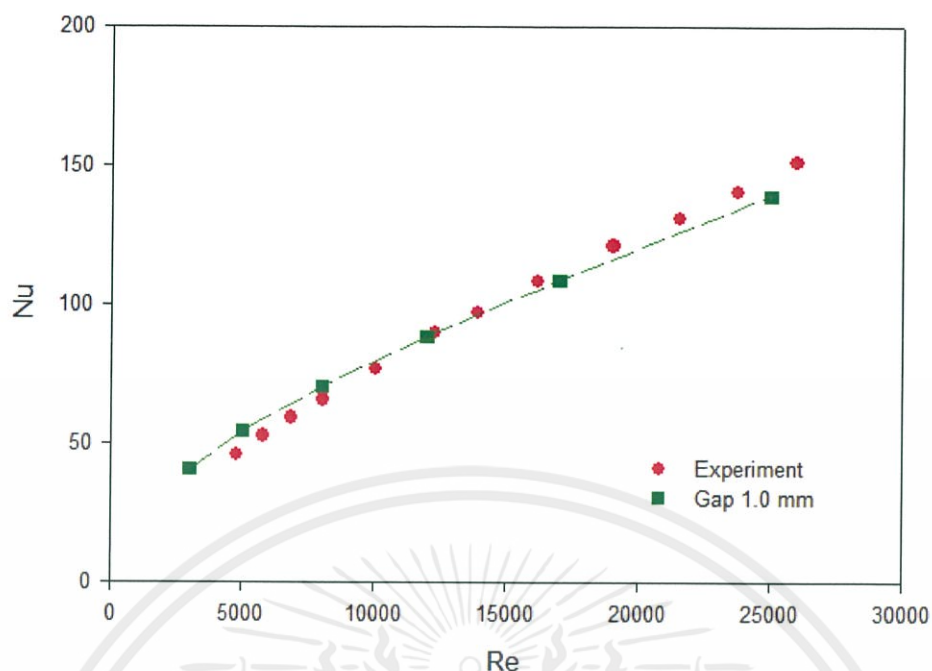
รูปที่ 5.5 กราฟระหว่าง Nu กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับแบบจำลองการปั่นป่วนแต่ละรูปแบบ



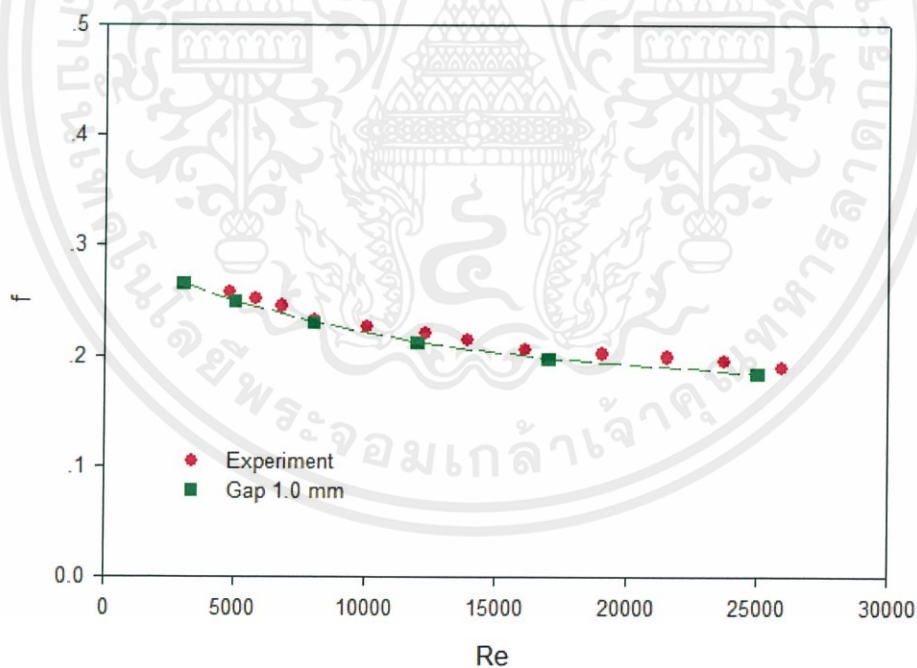
รูปที่ 5.6 กราฟระหว่าง  $f$  กับ  $Re$  เทียบระหว่างการทดลองกับแบบจำลองการปั่นป่วนแต่ละรูปแบบ

#### 5.4.3 การตรวจสอบระยะห่างระหว่างเส้นรอบวงนอกของวงแหวนกับผิวท่อ

ในการจำลองระยะห่างเส้นรอบวงนอกของวงแหวนกับผิวท่อได้ทำการจำลองที่ระยะห่างเท่ากับ 0.9, 1.0 และ 1.1 มิลลิเมตร พบว่าที่ระยะห่างเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรให้ค่าเลขนซ์เชิลท์และตัวประกอบเสียดทานใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ดังรูปที่ 5.7 และ 5.8



รูปที่ 5.7 กราฟระหว่าง Nu กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับการแบบจำลอง โดยใช้ช่องว่างเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.8 กราฟระหว่าง  $f$  กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับการแบบจำลอง โดยใช้ช่องว่างเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร

## 5.5 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

จากที่ได้ทำการตรวจสอบผลการจำลองจากโปรแกรมกับผลการทดลองตามที่ได้กล่าวมาแล้วพบว่าผลลัพธ์จากโปรแกรมนั้นเป็นที่น่าเชื่อถือ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าสามารถนำโปรแกรมไปทำการจำลองการไหลของของไหลได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดและจากที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยในงานวิจัยนี้สนใจการจำลองการถ่ายเทความร้อนนี้เป็นทอกลมที่ใส่วงแหวนเอียงรูปร่างต่างๆภายในท่อ ซึ่งมีอัตราส่วนการบล็อค (Blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 อัตราส่วนพิตช์ (Pitch ratio, PR) เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และมุมปะทะ (Attack angle) เท่ากับ 45 องศาแสดงในตาราง 5.1

ตาราง 5.1 แสดงลักษณะรูปร่างของวงแหวนแต่ละกรณีศึกษา

กรณีศึกษา	รูปร่างของวงแหวน	มุมปะทะ	BR	PR
1	วงแหวนสี่เหลี่ยม	45	0.10	0.5
2				1.0
3				1.5
4				0.5
5				1.0
6				1.5
7				0.5
8				1.0
9				1.5
10				วงแหวนห้าเหลี่ยม
11	1.0			
12	1.5			
13	0.5			
14	1.0			
15	1.5			
16	0.5			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.1 แสดงลักษณะรูปร่างของวงแหวนแต่ละกรณีศึกษา(ต่อ)

กรณีศึกษา	รูปร่างของวงแหวน	มุมปะทะ	BR	PR
17	วงแหวนห้าเหลี่ยม	45	0.20	1.0
18				1.5
19			0.10	0.5
20				1.0
21				1.5
22				0.5
23				วงแหวนหกเหลี่ยม
24	1.5			
25	0.5			
26	1.0			
27	1.5			
28			0.20	0.5
29				1.0
30				1.5
31				0.5
32				วงแหวนแปดเหลี่ยม
33	1.5			
34	0.5			
35	1.0			
36	1.5			
37	วงแหวนวงกลม	45	0.10	0.5
38				1.0
39				1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.1 แสดงลักษณะรูปร่างของวงแหวนแต่ละกรณีศึกษา(ต่อ)

กรณีศึกษา	รูปร่างของวงแหวน	มุมปะทะ	BR	PR	
40	วงแหวนวงกลม	45	0.15	0.5	
41				1.0	
42				1.5	
43			0.20	0.5	
44				1.0	
45				1.5	
46	วงแหวนวงรี	45	0.10	0.5	
47				1.0	
48				1.5	
49			0.15	0.5	
59				1.0	
51				1.5	
52				0.5	
53				0.20	1.0
54					1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย

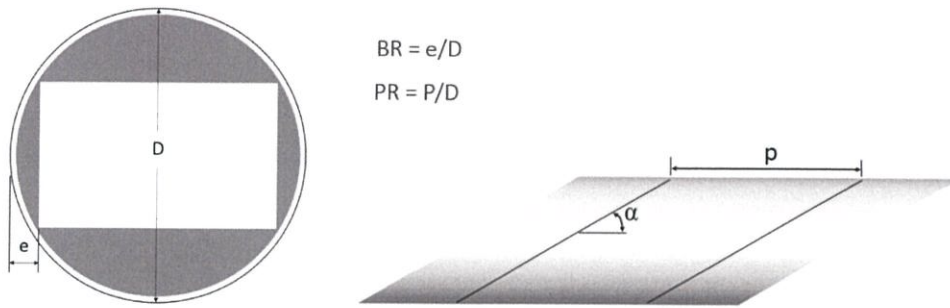
### 6.1 บทนำ

โดยทั่วไปสมรรถนะเชิงความร้อนจะสัมพันธ์กับการสูญเสียความดันเนื่องจากความเสียดทาน การเพิ่มสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนมักจะได้มาพร้อมกับการสูญเสียความดันที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับของไหลที่มีความหนาแน่นต่ำ เช่น ก๊าซ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมักจะนำไปสู่ความสิ้นเปลืองกำลังทางกลในรูปของพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์หรือพัดลม เพราะฉะนั้นการออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงจะต้องมีการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนในอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังทางกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนของไหล

ในบทนี้จะศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนได้แสดงในรูปของเลขนิจเซิลท์และผลของการสูญเสียความดันจะแสดงในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน จากพารามิเตอร์ทั้งสองนำมาสู่การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีการใส่วงแหวนด้านในและมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ 600 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยการศึกษาจะพิจารณาถึงอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์, รูปร่างต่างๆของวงแหวน ประกอบด้วย วงแหวนสี่เหลี่ยม วงแหวนห้าเหลี่ยม วงแหวนหกเหลี่ยม วงแหวนแปดเหลี่ยม วงแหวนกลมและวงแหวนวงรี ซึ่งมีมุมปะทะ 45 องศาและได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ อัตราส่วนการบล็อค (Blockage ratio, BR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยทำการศึกษาการไหลของอากาศที่เลขเรย์โนลด์ 3,000 ถึง 25000

### 6.2 วงแหวนสี่เหลี่ยม (Rectangle Ring)

ในส่วนของหัวข้อนี้ เราจะพิจารณาท่อกลมที่ใส่วงแหวนสี่เหลี่ยมเอียงมุม 45 องศา ภายในท่อดังรูปที่ 6.1 ในการจำลองได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการบล็อค  $BR = 0.10, 0.15$  และ  $0.20$  ตามลำดับและอัตราส่วนพิตช์  $PR = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการไหลในท่อกลม

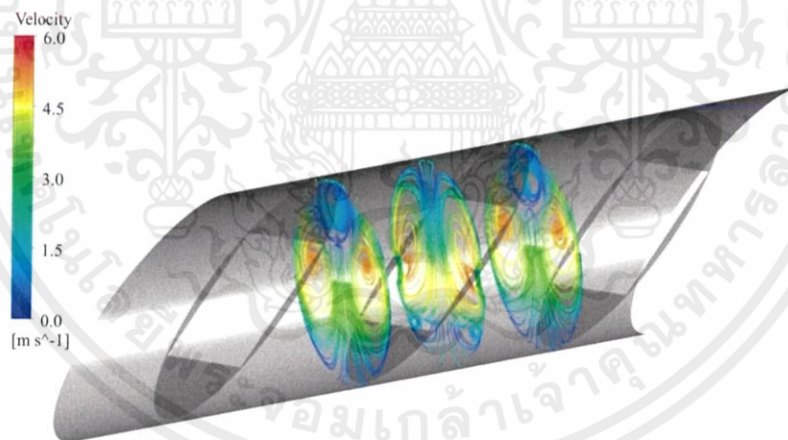


รูปที่ 6.1 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวนสี่เหลี่ยม

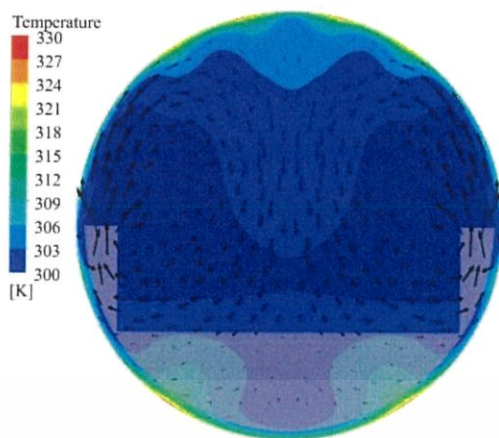
### 6.2.1 โครงสร้างการไหล

จากแผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวาง รูปที่ 6.2 จะพบว่าภายในท่อจะมีกระแสไหลวนเกิดขึ้นแต่กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจากการใส่วงแหวนรูปสี่เหลี่ยมนี้มีจุดไหลวนของกระแสที่เกิดการไหลวนได้น้อยที่บริเวณผิวส่วนบนของวงแหวน สังเกตได้จากแผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางดังรูปที่ 6.3 พบว่าบริเวณผิวของวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านบนจะมีอุณหภูมิต่ำมากเพราะจะเป็นจุดที่ได้รับความร้อนน้อย ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อย

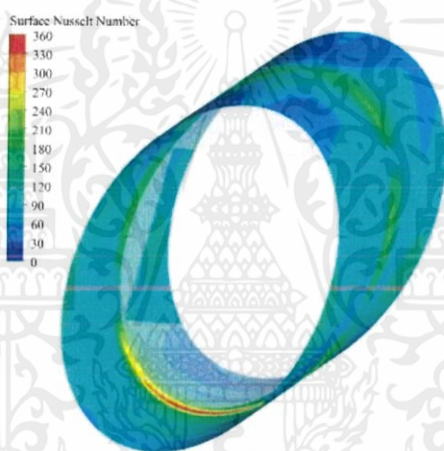
จากแผนภูมิแสดงเลขชี้เซลล์บนผนังท่อรูปที่ 6.4 จะพบว่าเลขชี้เซลล์จะมีค่ามากเฉพาะบริเวณด้านล่างของวงแหวน จึงสรุปได้ว่าวงแหวนสี่เหลี่ยมนั้นให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังไม่มากพอ



รูปที่ 6.2 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่วงแหวนสี่เหลี่ยมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)



รูปที่ 6.3 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางภายในท่อที่มีการใส่วงแหวนสี่เหลี่ยมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)



รูปที่ 6.4 แผนภูมิแสดงเลขนซ์เซิลท์บนผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนสี่เหลี่ยมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)

### 6.2.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

จากผลที่ได้จากการจำลองการไหล เมื่อกำหนดให้มุมปะทะของวงแหวนมีค่าเท่ากับ 45 องศาและมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการบล็อก BR และอัตราส่วนพิตช์ PR เพื่อหารูปแบบของวงแหวนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

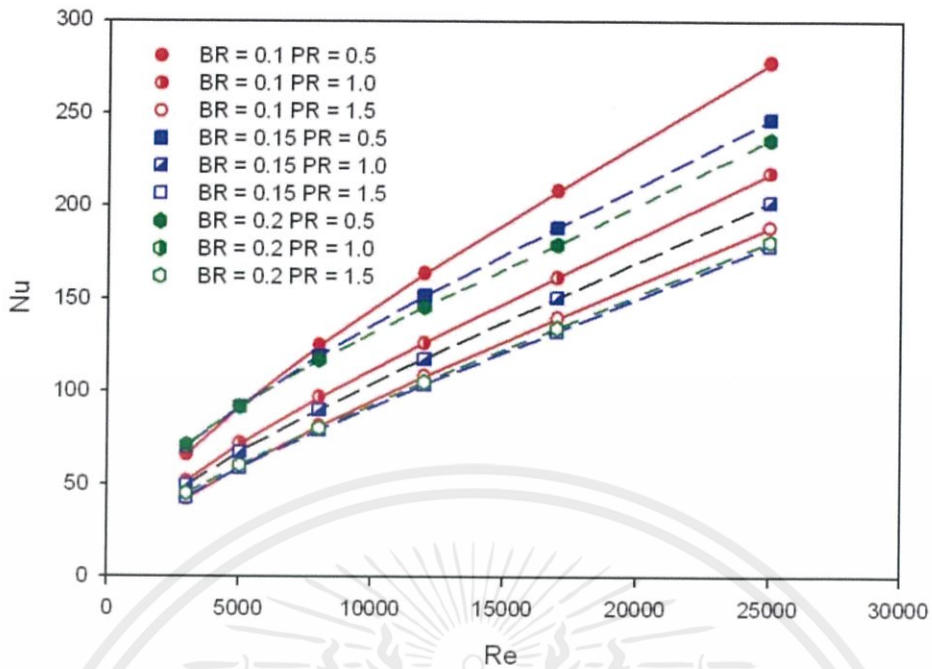
รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เซิลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนสี่เหลี่ยมใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เลขนซ์เซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นและเลขนซ์เซิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR และ PR มีคาลดลง โดยเลขนซ์เซิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 277.59 ที่ Re เท่ากับ 25000, BR เท่ากับ 0.1 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนสี่เหลี่ยมใส่งู่ด้านในต่อเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนสี่เหลี่ยมมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตซ์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์มีค่าน้อยลงและอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 7.11 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

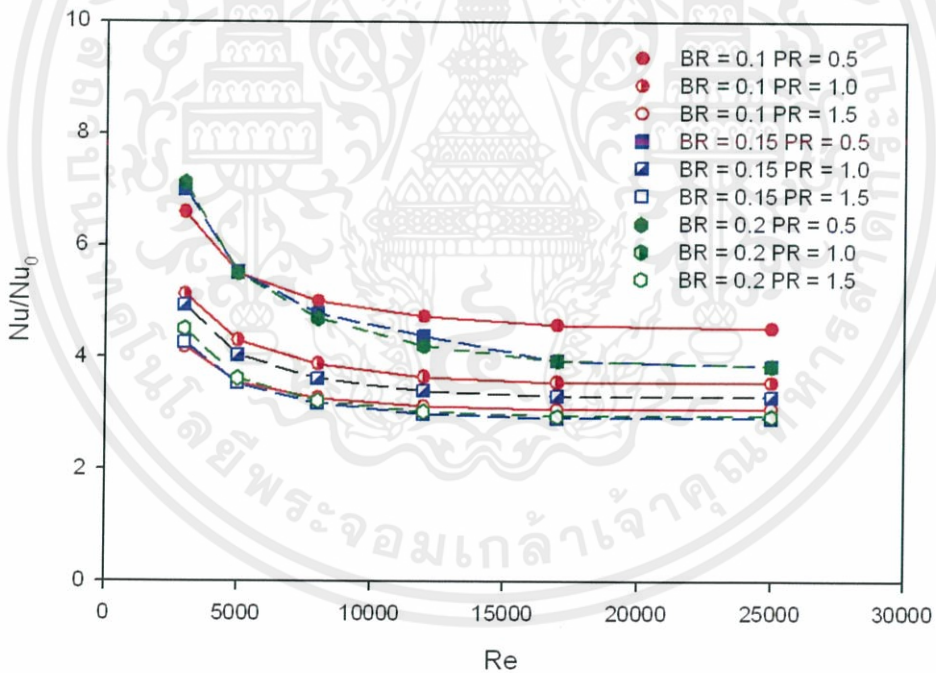
รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงแหวนสี่เหลี่ยมใส่งู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตซ์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR และ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 2.90 ที่ Re เท่ากับ 12000, BR เท่ากับ 0.1 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงแหวนสี่เหลี่ยมใส่งู่ด้านในต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตซ์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR และ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 116.52 ที่ Re เท่ากับ 25000, BR เท่ากับ 0.1 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีวงแหวนสี่เหลี่ยมใส่งู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตซ์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.12 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

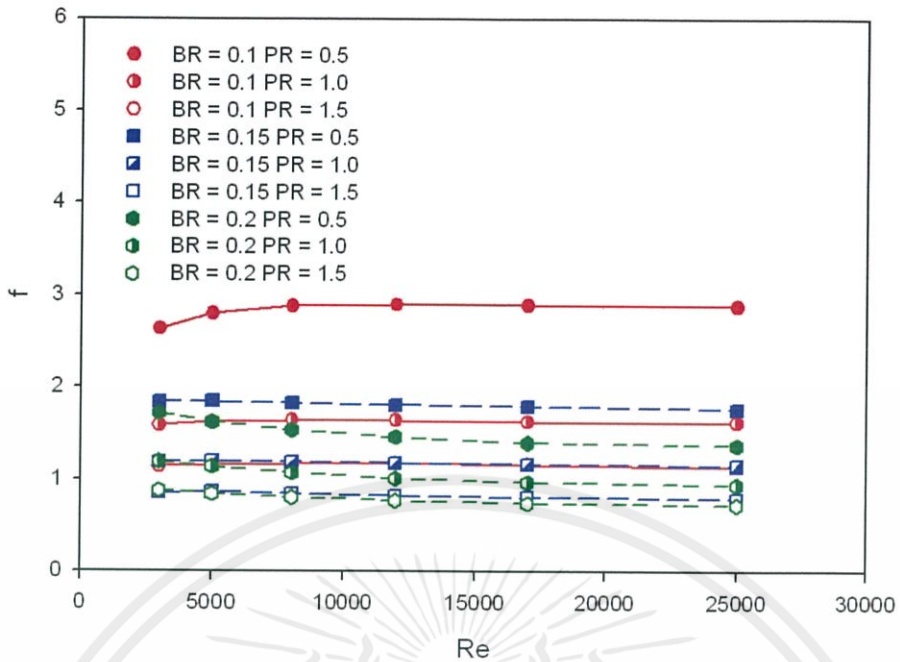


รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชิลท์

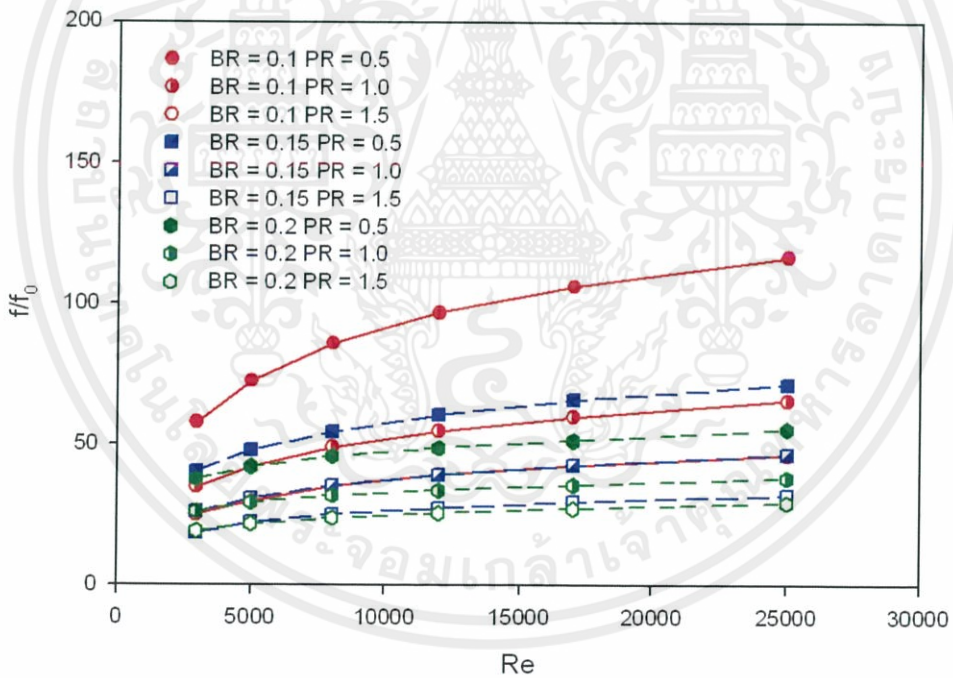


รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

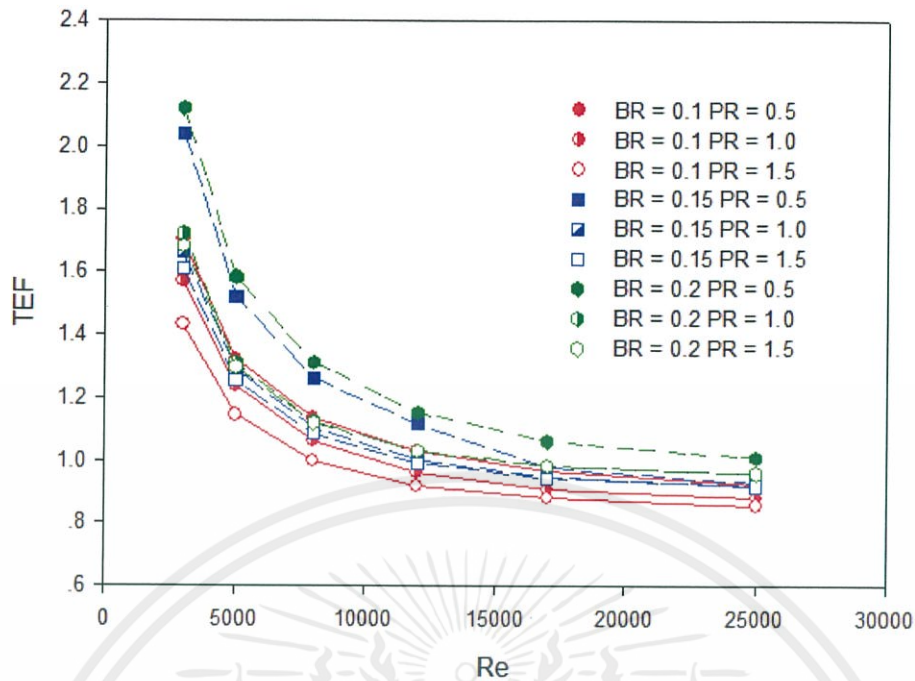


รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

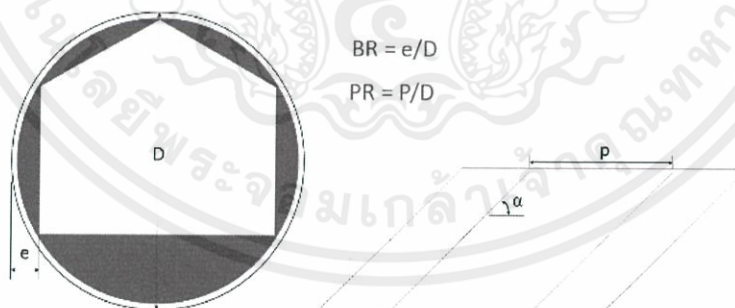
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน

### 6.3 วงแหวนห้าเหลี่ยม (Pentagonal Ring)

ในส่วนของหัวข้อนี้ เราจะพิจารณาท่อกลมที่ใส่วงแหวนห้าเหลี่ยมเรียงมุม 45 องศา ภายในท่อ ดังรูปที่ 6.10 ในการจำลองได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการบล็อก BR = 0.10, 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ และอัตราส่วนพิทช์ PR = 0.5, 1.0 และ 1.5 ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความเสียหายจากการไหลในท่อกลม



รูปที่ 6.10 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวนห้าเหลี่ยม

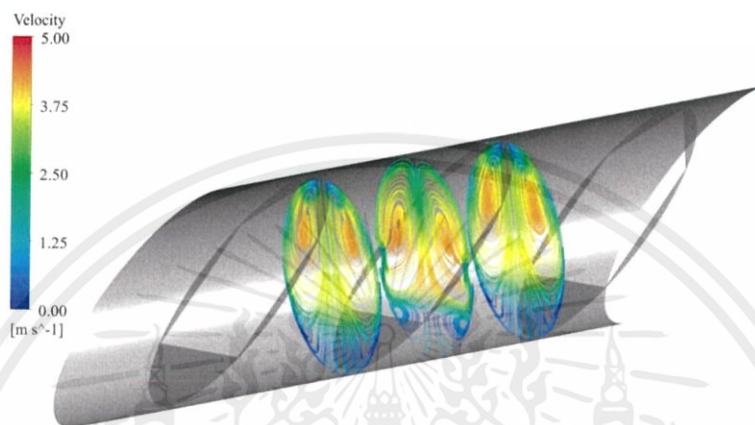
#### 6.3.1 โครงสร้างการไหล

จากแผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวาง รูปที่ 6.11 จะพบว่าภายในท่อจะมีกระแสไหลวนเกิดขึ้นและพบว่ากระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจากการใส่วงแหวนรูปห้าเหลี่ยมนี้มีความรุนแรงของการไหลวนที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงแหวนสี่เหลี่ยมซึ่งทำให้ได้การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า สังเกตได้จากแผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางดังรูปที่ 6.12 พบว่าบริเวณผิวของวงแหวนห้า

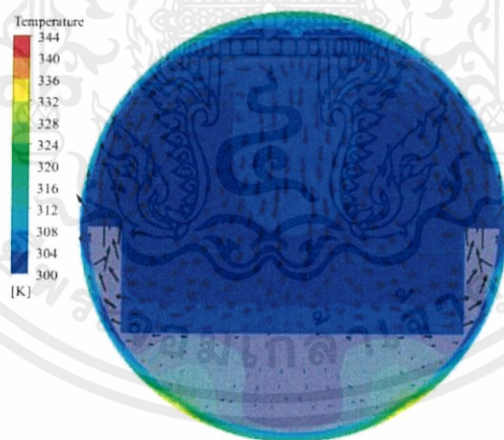
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลี่ยมด้านบนที่เป็นจุดอับที่ได้รับความร้อนน้อยกว่าบริเวณอื่นจะเป็นบริเวณที่มีขนาดความกว้างน้อยกว่า จุดอับของวงแหวนสี่เหลี่ยม ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่าวงแหวนสี่เหลี่ยม

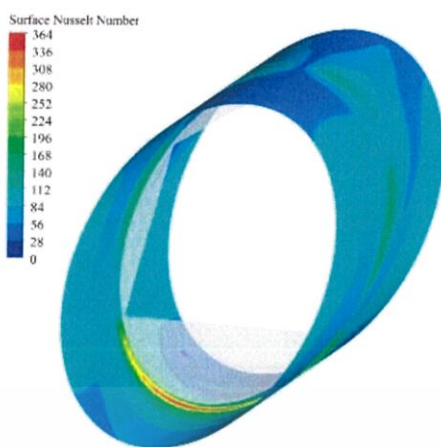
จากแผนภูมิแสดงเลขนซ์เซิลท์บนผนังท่อรูปที่ 6.13 จะพบว่าเลขนซ์เซิลท์ที่ได้จากทั้งวงแหวนสี่เหลี่ยมและวงแหวนห้าเหลี่ยมมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าวงแหวนห้าเหลี่ยมนั้นให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าวงแหวนสี่เหลี่ยมเล็กน้อย ดังนั้นสมรรถนะทางความร้อนจึงสูงกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 6.11 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่วงแหวนห้าเหลี่ยมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)



รูปที่ 6.12 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางภายในท่อที่มีการใส่วงแหวนห้าเหลี่ยมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)



รูปที่ 6.13 แผนภูมิแสดงเลขนซ์เชิลท์บนผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนห้าเหลี่ยมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)

### 6.3.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

จากผลที่ได้จากการจำลองการไหล เมื่อกำหนดให้มุมปะทะของวงแหวนมีค่าเท่ากับ 45 องศาและมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการบล็อก BR และอัตราส่วนพิตช์ PR เพื่อหารูปแบบของวงแหวนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

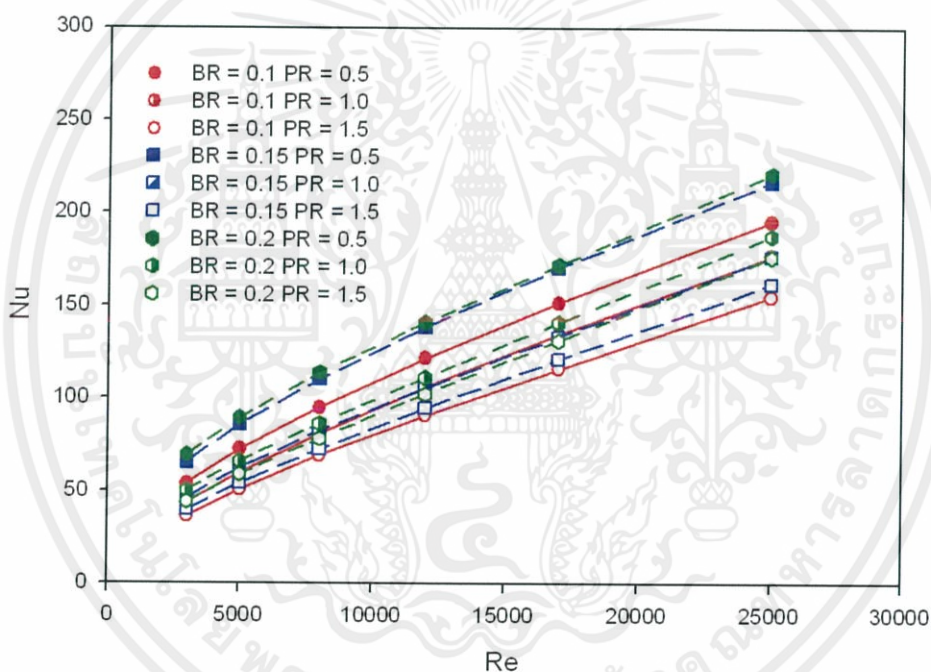
รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนห้าเหลี่ยมใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เลขนซ์เชิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นและเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 221.20 ที่ Re เท่ากับ 25000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนห้าเหลี่ยมใส่อยู่ด้านในต่อเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์มีค่าน้อยลงและอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 6.91 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

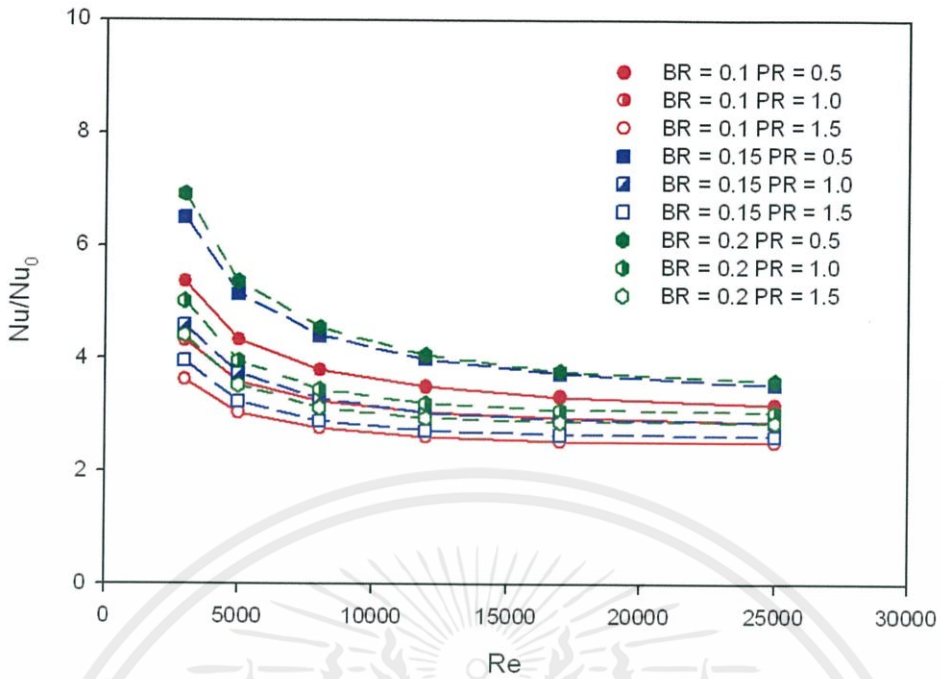
รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงแหวนห้าเหลี่ยมใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 1.31 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงแหวนห้าเหลี่ยมใส่ง่ายด้านในต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 38.76 ที่ Re เท่ากับ 25000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

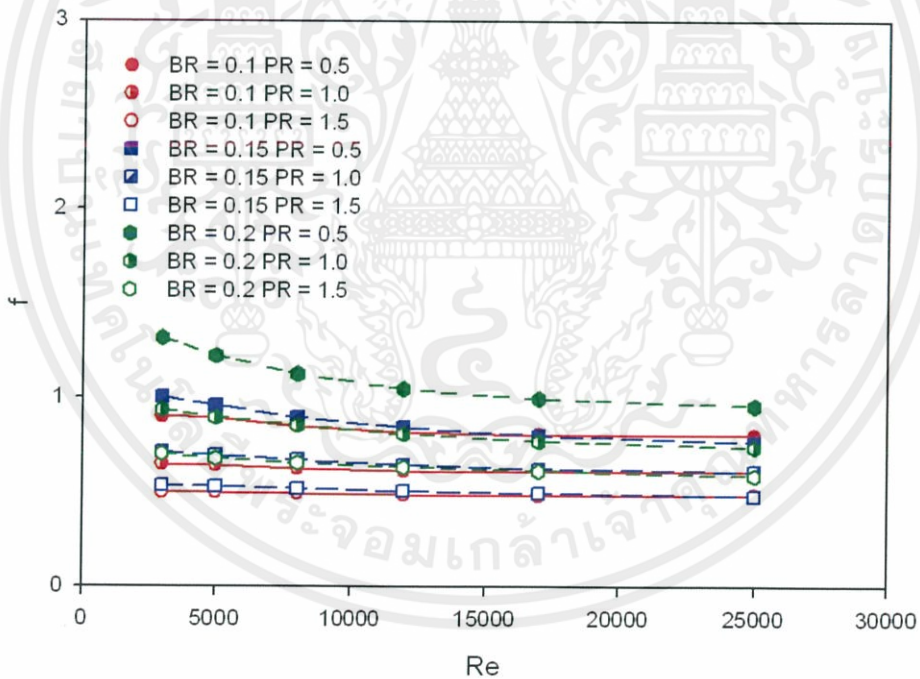
รูปที่ 6.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีวงแหวนห้าเหลี่ยมใส่ง่ายด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.32 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.15 และ PR เท่ากับ 0.5



รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนัสเซลท์

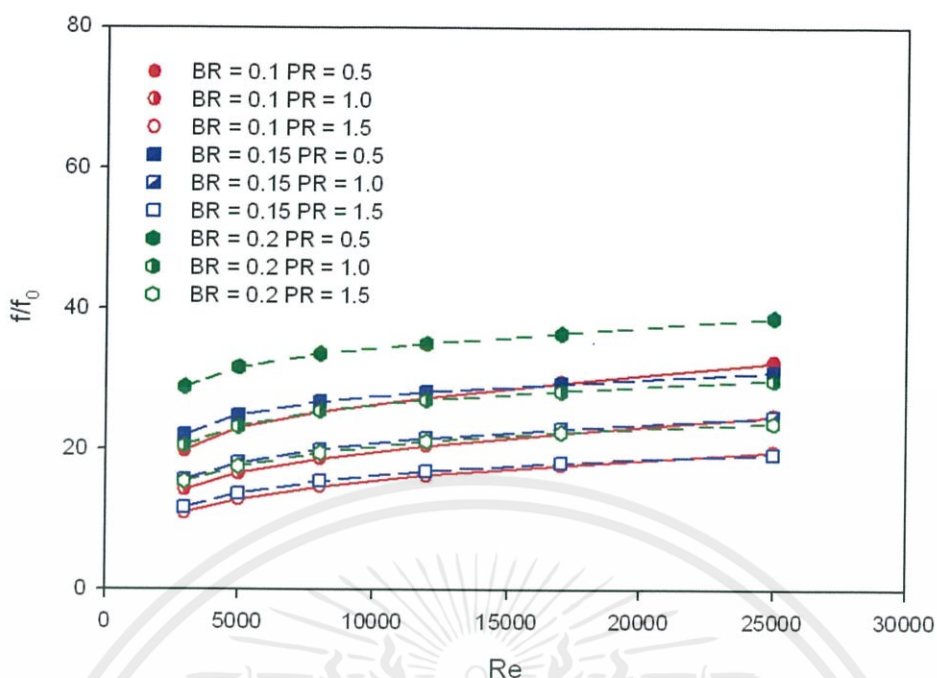


รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เซิลท์

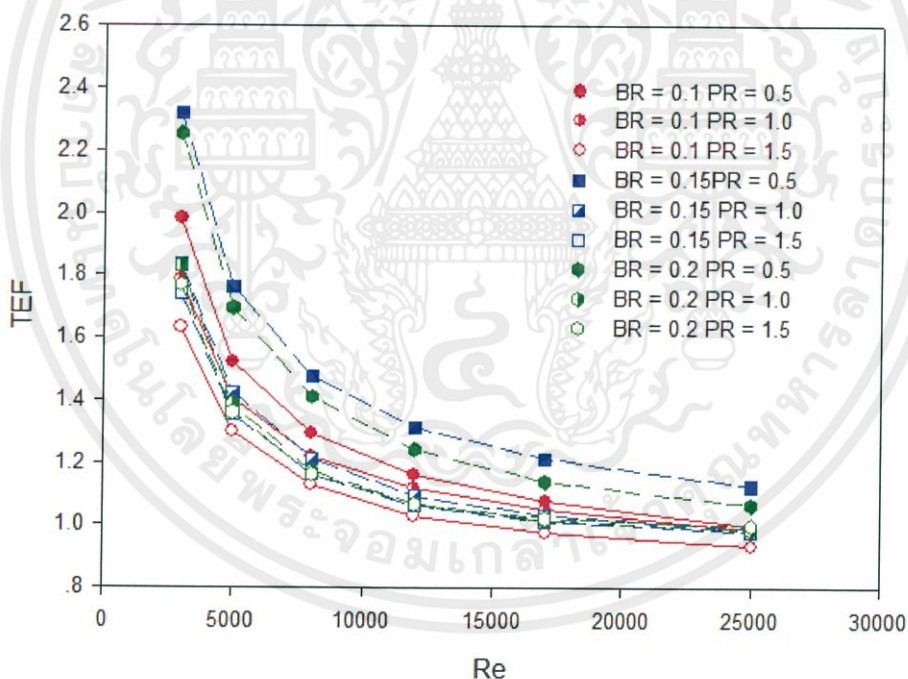


รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

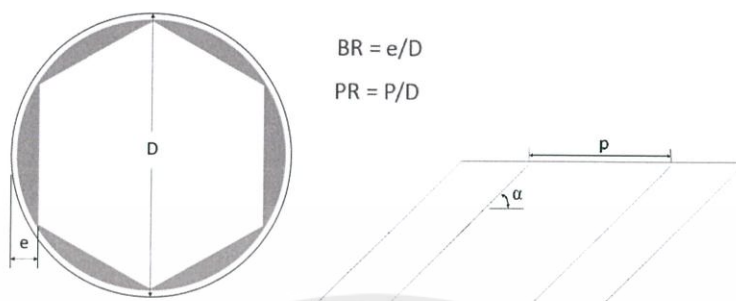


รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน

#### 6.4 วงแหวนหกเหลี่ยม (Hexagonal Ring)

ในส่วนของหัวข้อนี้ เราจะพิจารณาท่อกลมที่ใส่วงแหวนหกเหลี่ยมเอียงมุม 45 องศา ภายในท่อดังรูปที่ 6.19 ในการจำลองได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการบล็อก BR = 0.10, 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ

และอัตราส่วนพิตช์  $PR = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการไหลในท่อกลม

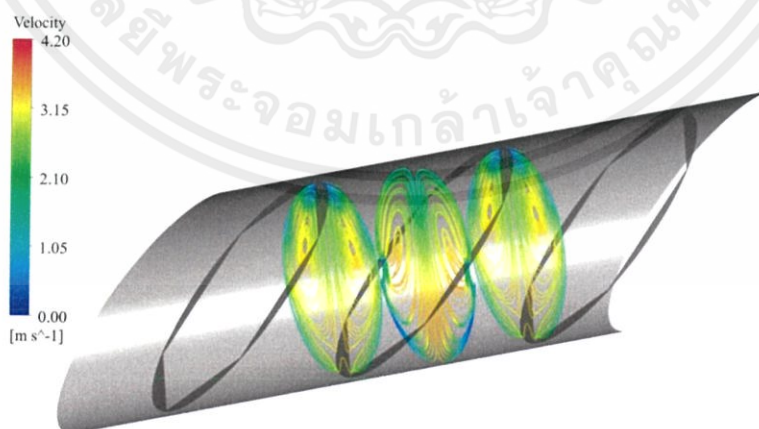


รูปที่ 6.19 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวนทกเหลี่ยม

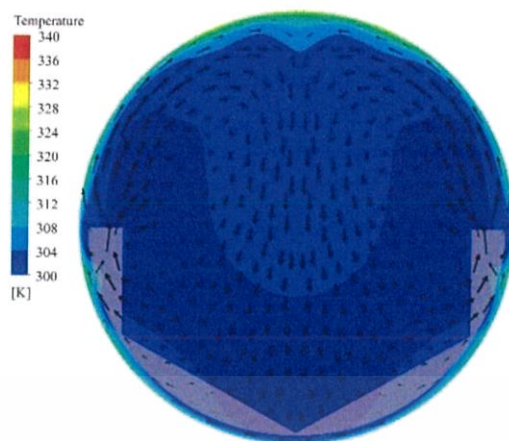
#### 6.4.1 โครงสร้างการไหล

จากแผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวาง รูปที่ 6.20 จะพบว่าภายในท่อจะมีกระแสไหลวนเกิดขึ้นและพบว่ากระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจากการใส่วงแหวนรูปทกเหลี่ยมนี้มีความรุนแรงของการไหลวนที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงแหวนห้าเหลี่ยมซึ่งทำให้ได้การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า สังเกตได้จากแผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางดังรูปที่ 6.21 พบว่า บริเวณด้านล่างของวงแหวนเมื่อเทียบกับวงแหวนรูปห้าเหลี่ยม วงแหวนรูปทกเหลี่ยมจะมีการขวงการไหลของกระแสที่น้อยกว่าซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลวนที่มากกว่า ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่าวงแหวนห้าเหลี่ยม

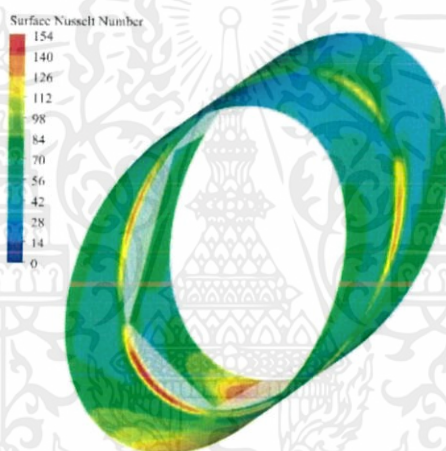
จากแผนภูมิแสดงเลขนซ์เชิลท์บนผนังท่อรูปที่ 6.22 จะพบว่าเลขนซ์เชิลท์ที่ได้จากวงแหวนทกเหลี่ยมมีค่ามากกว่าวงแหวนห้าเหลี่ยม จึงสรุปได้ว่าวงแหวนทกเหลี่ยมนั้นให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าวงแหวนห้าเหลี่ยม ดังนั้นจึงได้สมรรถนะทางความร้อนที่สูงกว่า



รูปที่ 6.20 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่วงแหวนทกเหลี่ยมด้านใน ( $BR=0.1, PR=1.0, Re=8000$ )



รูปที่ 6.21 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางภายในท่อที่มีการใส่วงแหวนทกเหลี่ยมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)



รูปที่ 6.22 แผนภูมิแสดงเลขนซ์เชิลท์บนผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนทกเหลี่ยมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)

#### 6.4.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

จากผลที่ได้จากการจำลองการไหล เมื่อกำหนดให้มุมปะทะของวงแหวนมีค่าเท่ากับ 45 องศาและการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการบล็อก BR และอัตราส่วนพิตช์ PR เพื่อหารูปแบบของวงแหวนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

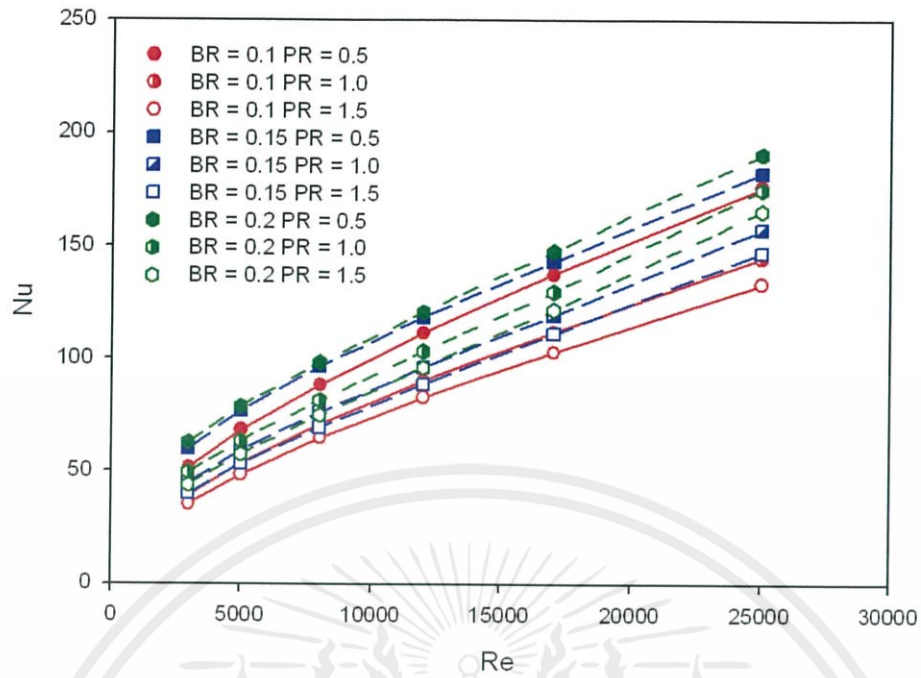
รูปที่ 6.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนทกเหลี่ยมใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เลขนซ์เชิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นและเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 190.52 ที่ Re เท่ากับ 25000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนหกเหลี่ยมใส่ง่ายด้านในต่อเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์มีค่าน้อยลงและอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 6.24 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

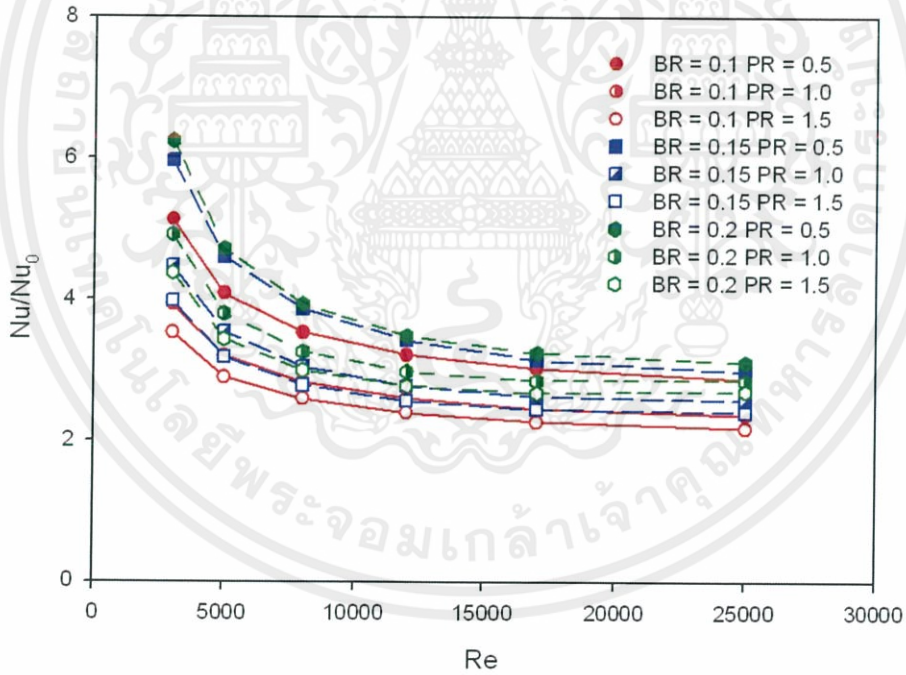
รูปที่ 6.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงแหวนหกเหลี่ยมใส่ง่ายด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 1.03 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงแหวนหกเหลี่ยมใส่ง่ายด้านในต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 28.88 ที่ Re เท่ากับ 25000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีวงแหวนหกเหลี่ยมใส่ง่ายด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.39 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.15 และ PR เท่ากับ 0.5

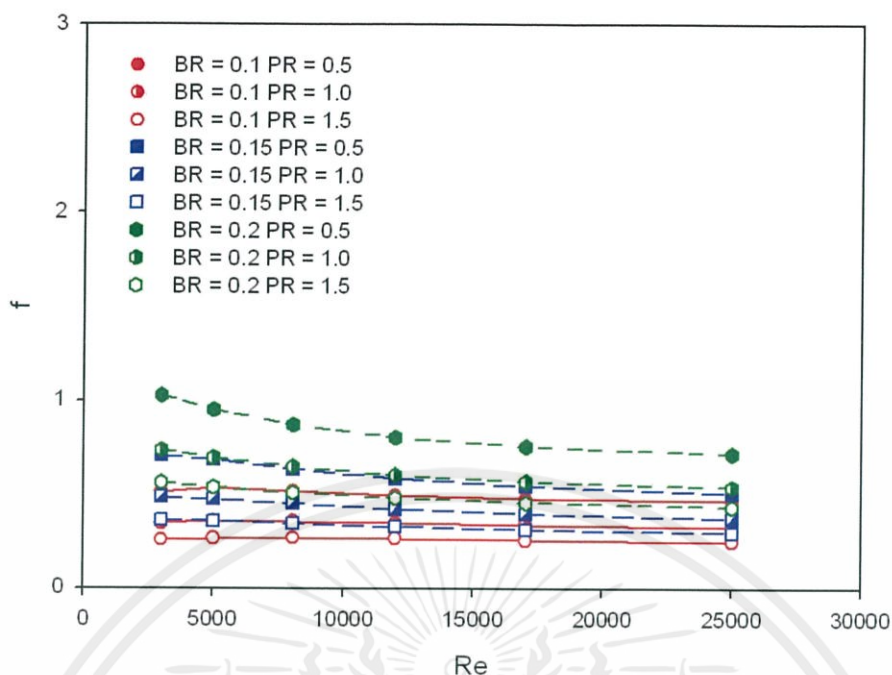


รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เซิลท์

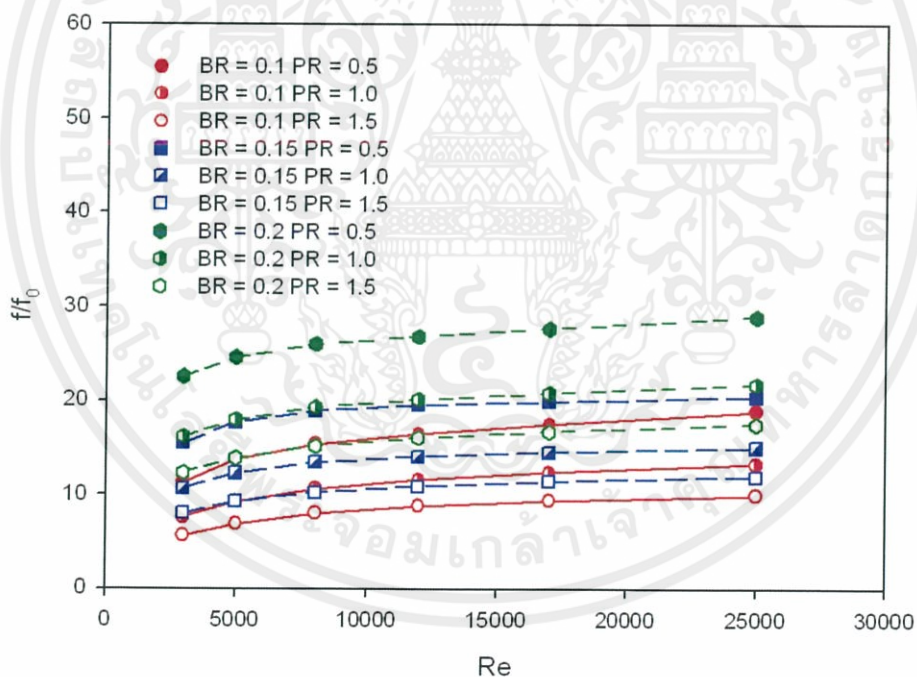


รูปที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เซิลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

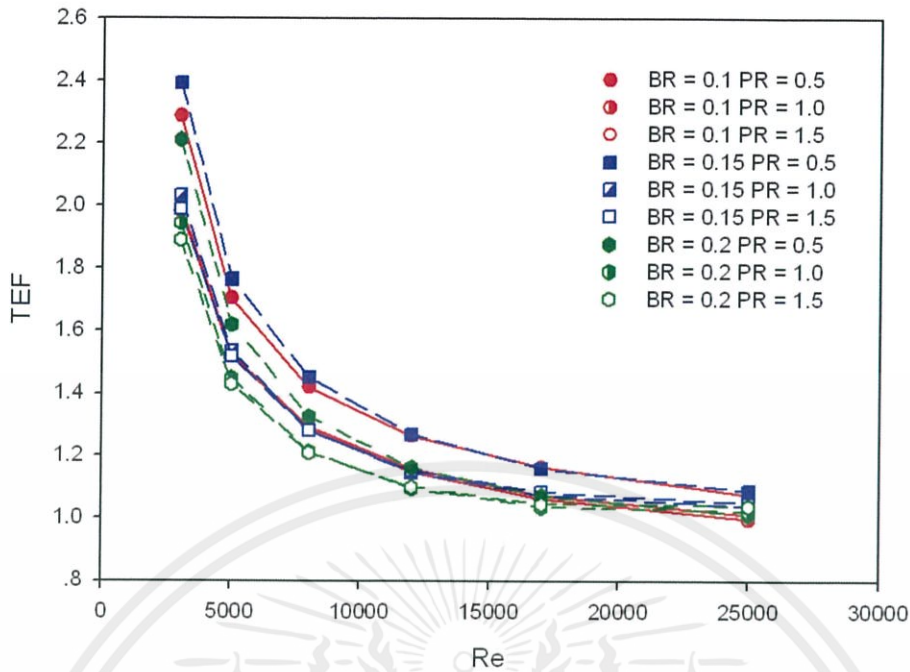


รูปที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน



รูปที่ 6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

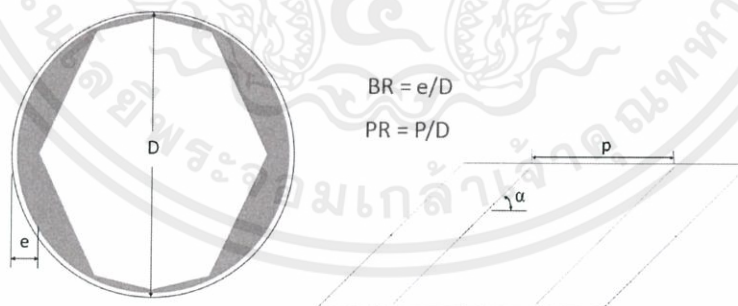
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน

## 6.5 วงแหวนแปดเหลี่ยม (Octagonal Ring)

ในส่วนของหัวข้อนี้ เราจะพิจารณาท่อกลมที่ใส่วงแหวนแปดเหลี่ยมเอียงมุม 45 องศา ภายในท่อ ดังรูปที่ 6.28 ในการจำลองได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการบล็อก BR = 0.10, 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ และอัตราส่วนพิทช์ PR = 0.5, 1.0 และ 1.5 ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการไหลในท่อกลม



รูปที่ 6.28 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวนแปดเหลี่ยม

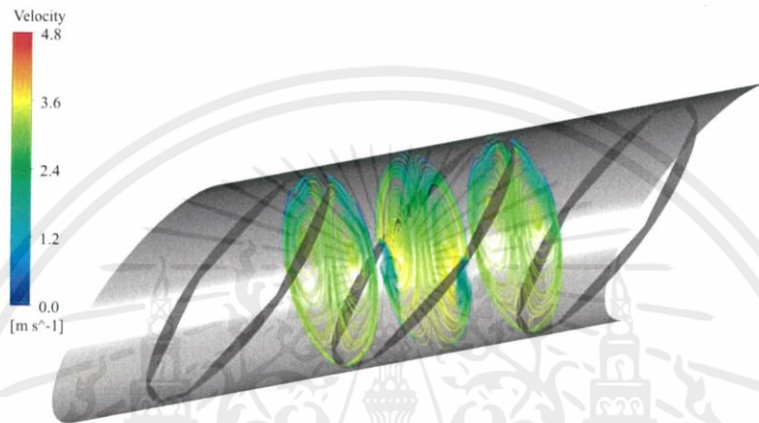
### 6.5.1 โครงสร้างการไหล

จากแผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวาง รูปที่ 6.29 จะพบว่าภายในท่อจะมีกระแสไหลวนเกิดขึ้นและพบว่ากระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจากการใส่วงแหวนรูปแปดเหลี่ยมนี้มีความรุนแรงของการไหลวนและกระแสมีการไหลได้อย่างทั่วถึงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงแหวนหกเหลี่ยมซึ่งทำให้ได้การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า สังเกตได้จากแผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางดังรูปที่ 6.30

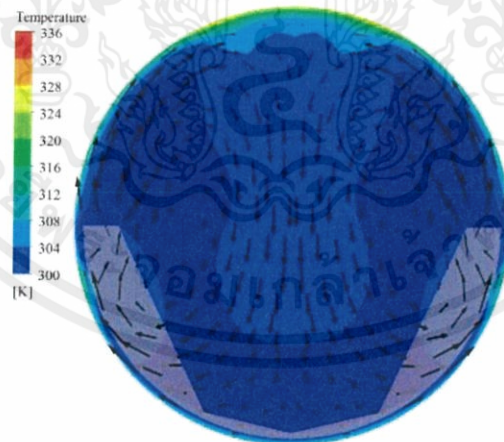
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า กระแสที่ไหลวนจะไหลวนได้ดีกว่าวงแหวนรูปหกเหลี่ยมทำให้ของไหลจากบริเวณกลางท่อสามารถไหลวนไปรับความร้อนบริเวณขอบท่อได้ดีกว่า ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่าวงแหวนหกเหลี่ยม

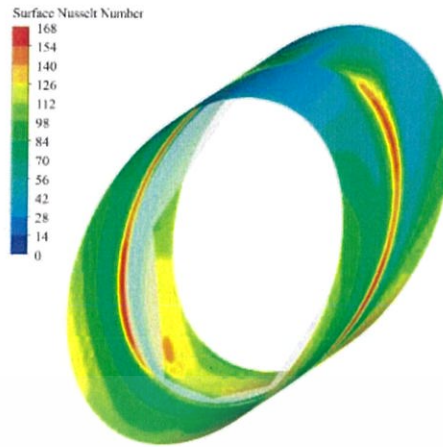
จากแผนภูมิแสดงเลขนซ์เชิลท์บนผนังท่อรูปที่ 6.31 จะพบว่าเลขนซ์เชิลท์ที่ได้จากวงแหวนแปดเหลี่ยมมีค่ามากกว่าวงแหวนหกเหลี่ยมโดยเฉพาะบริเวณขอบท่อ จึงสรุปได้ว่าวงแหวนแปดเหลี่ยมนั้นให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าวงแหวนหกเหลี่ยม ดังนั้นจึงได้สมรรถนะทางความร้อนที่สูงกว่า



รูปที่ 6.29 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่วงแหวนแปดเหลี่ยมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)



รูปที่ 6.30 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางภายในท่อที่มีการใส่วงแหวนแปดเหลี่ยมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)



รูปที่ 6.31 แผนภูมิแสดงเลขนซ์เชิลท์บนผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนแปดเหลี่ยมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)

### 6.5.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

จากผลที่ได้จากการจำลองการไหล เมื่อกำหนดให้มุมปะทะของวงแหวนมีค่าเท่ากับ 45 องศาและมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการบล็อก BR และอัตราส่วนพิตช์ PR เพื่อหารูปแบบของวงแหวนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

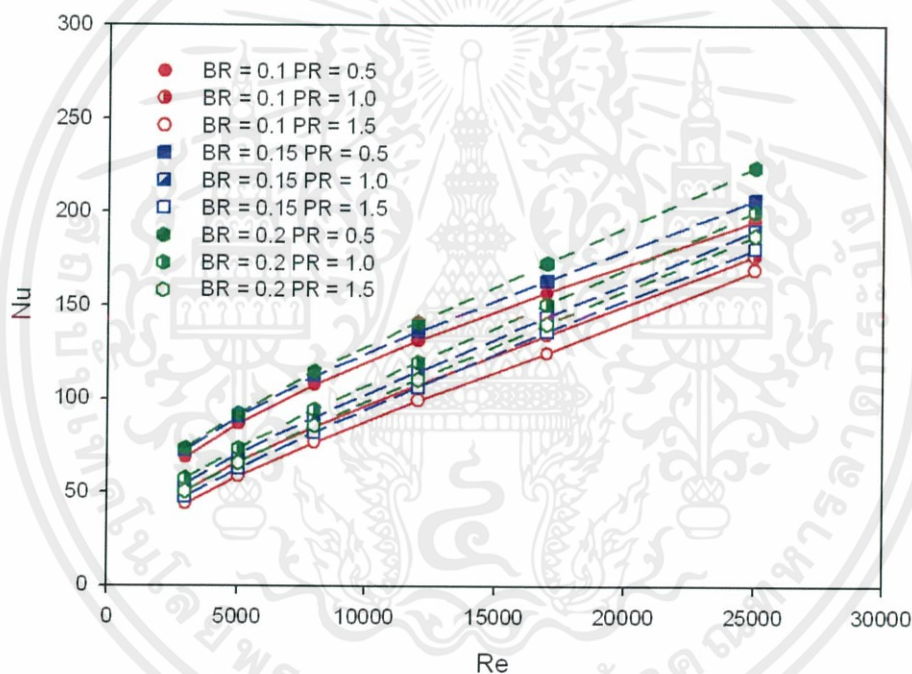
รูปที่ 6.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนแปดเหลี่ยมใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เลขนซ์เชิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นและเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 224.26 ที่ Re เท่ากับ 25000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนแปดเหลี่ยมใส่อยู่ด้านในต่อเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์มีค่าน้อยลงและอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 7.33 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

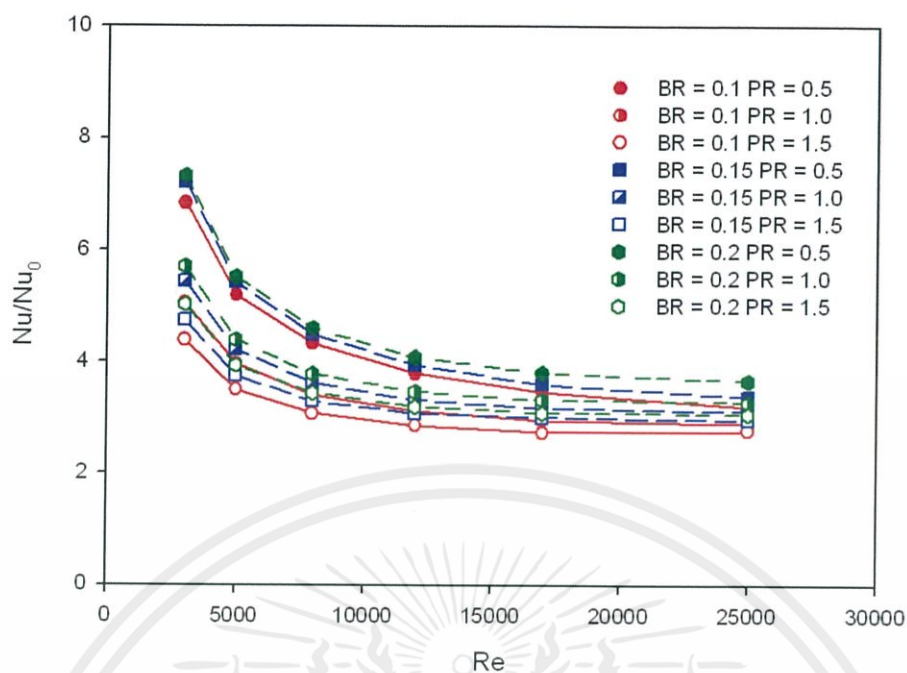
รูปที่ 6.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงแหวนแปดเหลี่ยมใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 1.45 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงแหวนแปดเหลี่ยมใใส่อยู่ด้านในต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 43.94 ที่ Re เท่ากับ 25000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

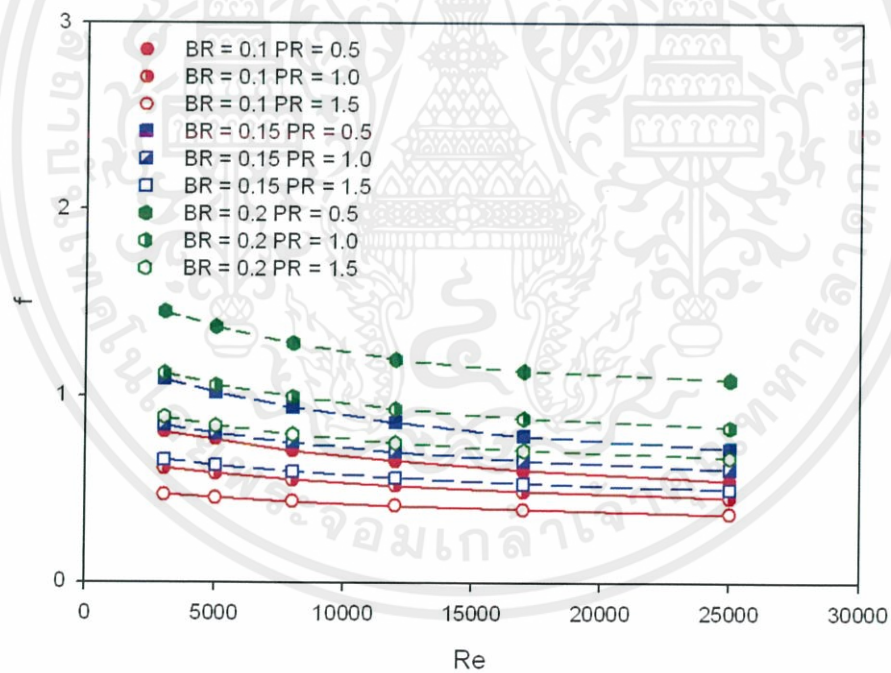
รูปที่ 6.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีวงแหวนแปดเหลี่ยมใใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.63 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.1 และ PR เท่ากับ 0.5



รูปที่ 6.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชิลท์

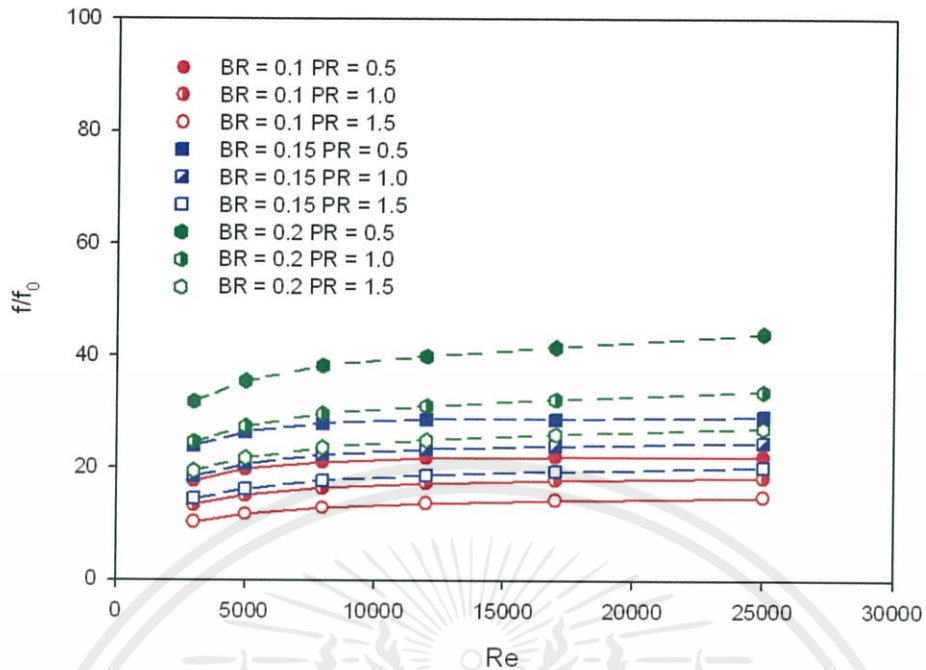


รูปที่ 6.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เซิลท์

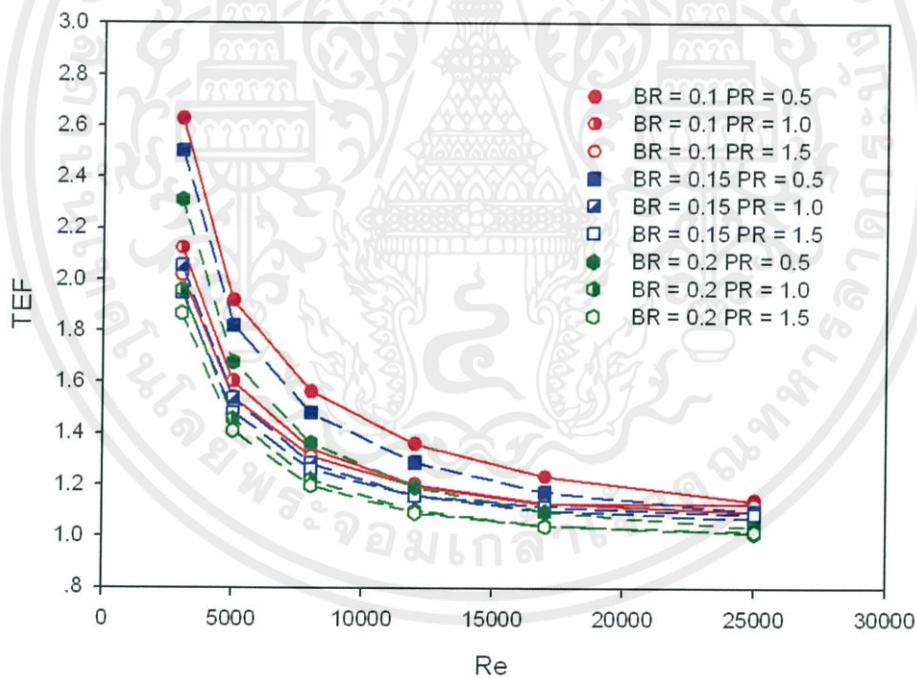


รูปที่ 6.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.35 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

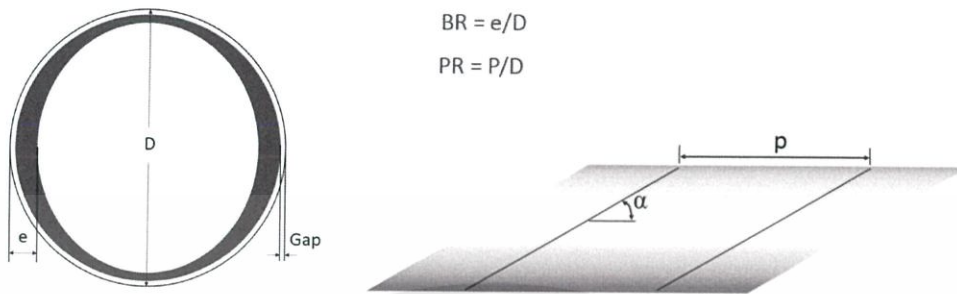


รูปที่ 6.36 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน

## 6.6 วงแหวนกลม (Circular Ring)

ในส่วนของหัวข้อนี้ เราจะพิจารณาท่อกลมที่ใส่วงแหวนกลมเอียงมุม 45 องศา ภายในท่อ ดังรูปที่ 6.37 ในการจำลองได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการบล็อก BR = 0.10, 0.15 และ 0.20 ตามลำดับและ

อัตราส่วนพิตช์  $PR = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการไหลในท่อกลม

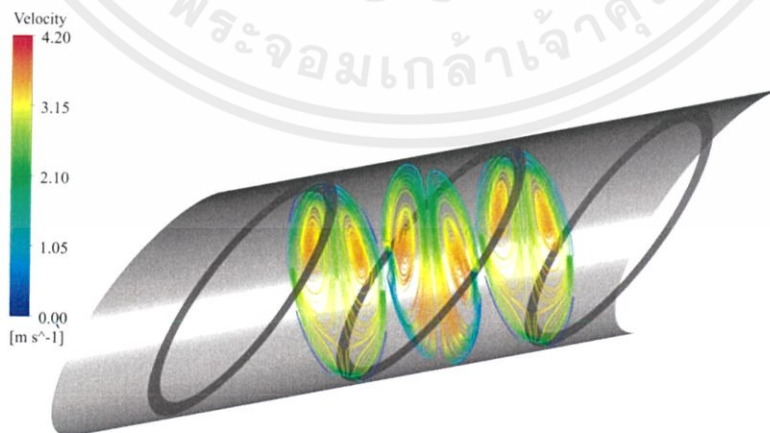


รูปที่ 6.37 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวน

### 6.6.1 โครงสร้างการไหล

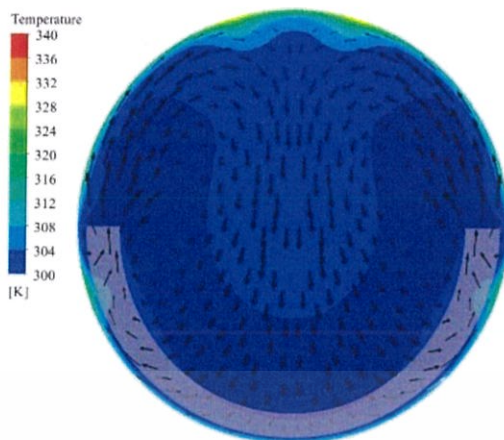
จากแผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวาง รูปที่ 6.38 จะพบว่าภายในท่อจะมีกระแสไหลวนเกิดขึ้นและพบว่ากระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจากการใส่วงแหวนกลมนี้มีความรุนแรงของการไหลวนมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงแหวนรูปเหลี่ยมทั้งหมดที่ผ่านมาเพราะมีการขวางการไหลของของไหลที่น้อยกว่า ซึ่งทำให้ได้การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า สังเกตได้จากแผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางดังรูปที่ 6.39 พบว่า กระแสที่ไหลวนจะไหลวนได้ดีกว่าวงแหวนรูปเหลี่ยมทำให้ของไหลจากบริเวณกลางท่อสามารถไหลวนไปรับความร้อนบริเวณขอบท่อได้ดีกว่า ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่าวงแหวนรูปเหลี่ยม

จากแผนภูมิแสดงเลขชี้เซลล์ที่บนผนังท่อรูปที่ 6.40 จะพบว่าเลขชี้เซลล์ที่ได้จากวงแหวนกลมมีค่ามากกว่าวงแหวนเหลี่ยม จึงสรุปได้ว่าวงแหวนกลมนั้นให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าวงแหวนเหลี่ยม ดังนั้นจึงได้สมรรถนะทางความร้อนที่สูงกว่า

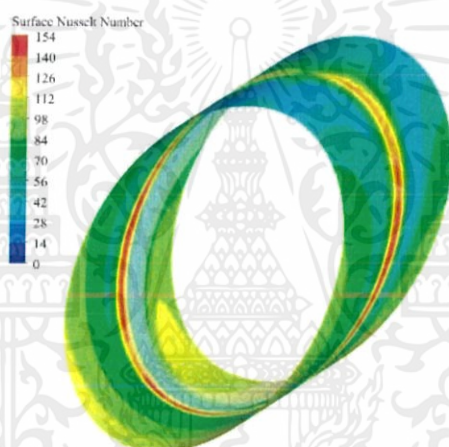


รูปที่ 6.38 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่วงแหวนกลมด้านใน ( $BR=0.1, PR=1.0, Re=8000$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.39 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางภายในท่อที่มีการใส่วงแหวนกลมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)



รูปที่ 6.40 แผนภูมิแสดงเลขนซ์เซิลท์บนผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนกลมด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)

### 6.6.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

จากผลที่ได้จากการจำลองการไหล เมื่อกำหนดให้มุมปะทะของวงแหวนมีค่าเท่ากับ 45 องศาและมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการบล็อก BR และอัตราส่วนพิตช์ PR เพื่อหารูปแบบของวงแหวนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

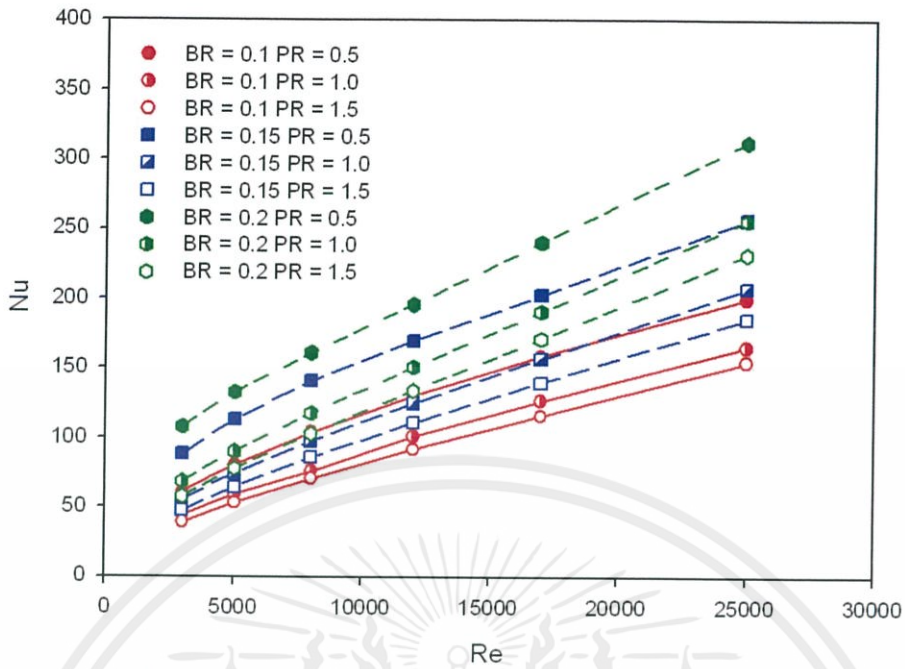
รูปที่ 6.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เซิลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนกลมใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เลขนซ์เซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นและเลขนซ์เซิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยเลขนซ์เซิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 312.21 ที่ Re เท่ากับ 25000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เซลล์ของท่อกลมที่มีวงแหวนกลมใส่อยู่ด้านในต่อเลขนซ์เซลล์ของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อค 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนเลขนซ์เซลล์ที่มีค่าน้อยลงและอัตราส่วนเลขนซ์เซลล์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยอัตราส่วนเลขนซ์เซลล์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 10.73 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

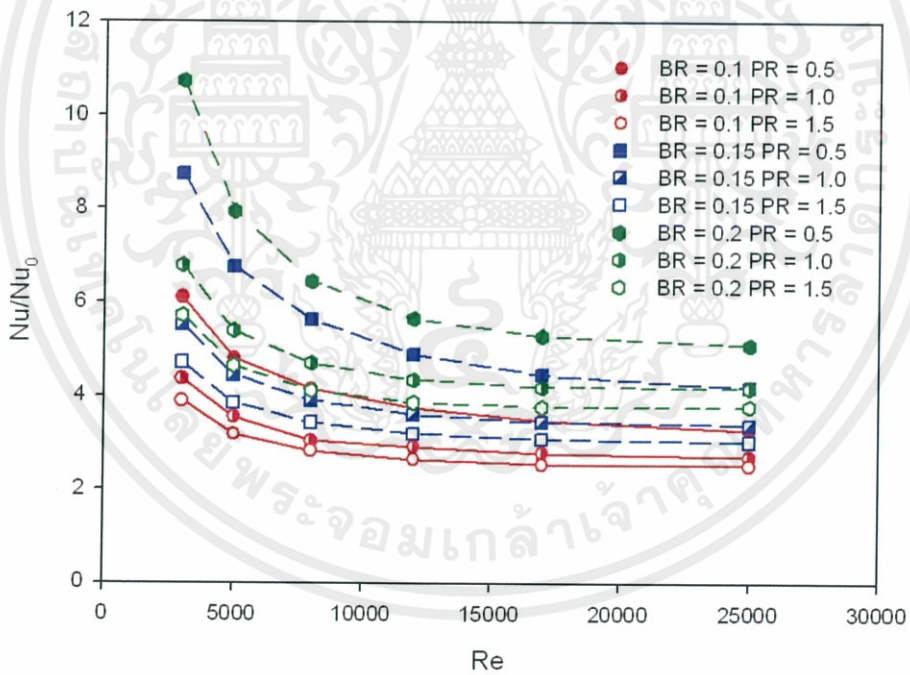
รูปที่ 6.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงแหวนกลมใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อค 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 3.51 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงแหวนกลมใส่อยู่ด้านในต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อค 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 109.23 ที่ Re เท่ากับ 25000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีวงแหวนกลมใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อค 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.65 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.15 และ PR เท่ากับ 0.5

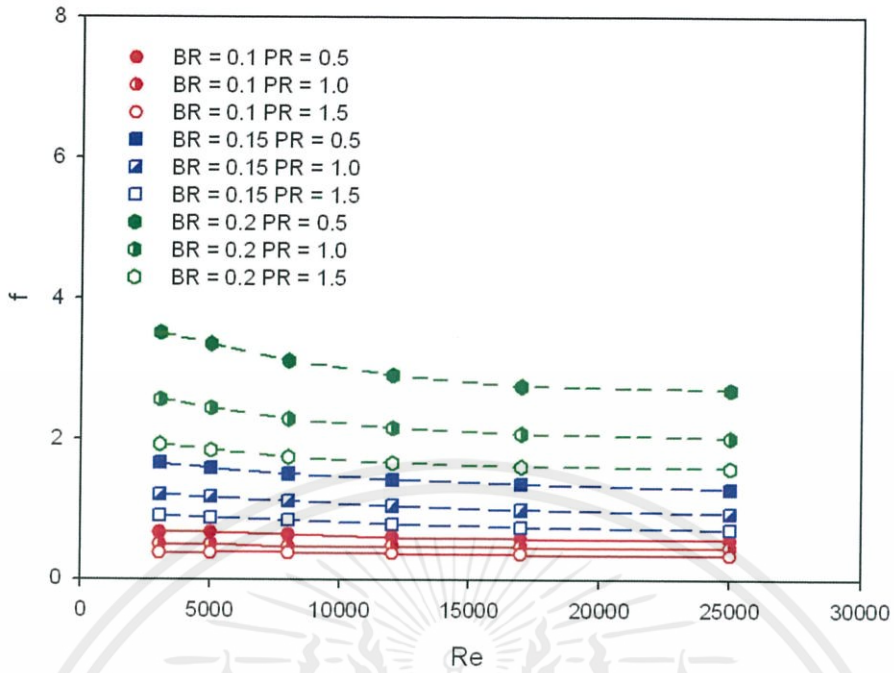


รูปที่ 6.41 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เซิลท์

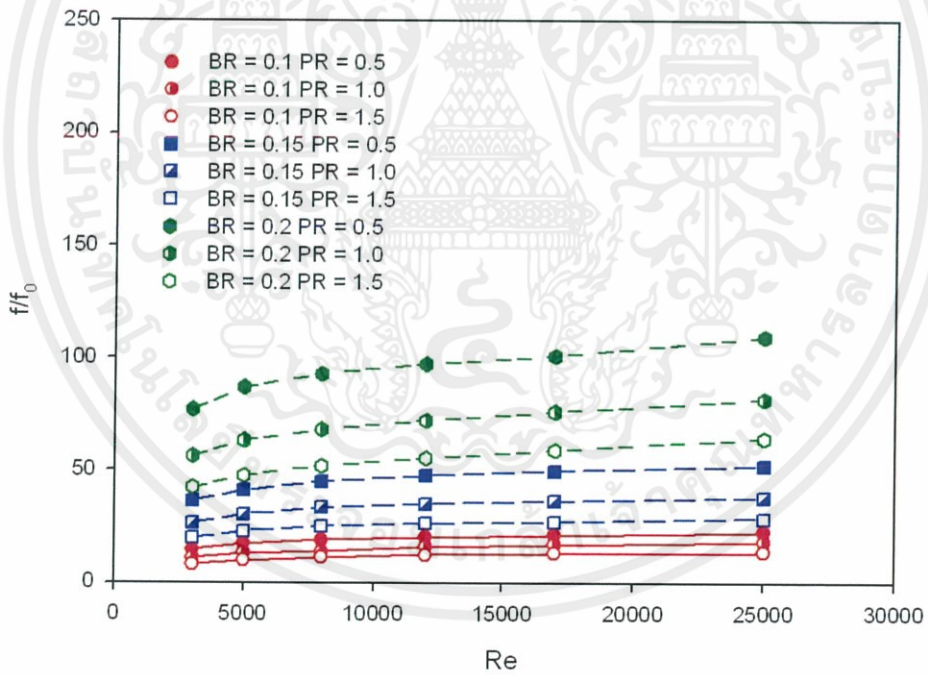


รูปที่ 6.42 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เซิลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

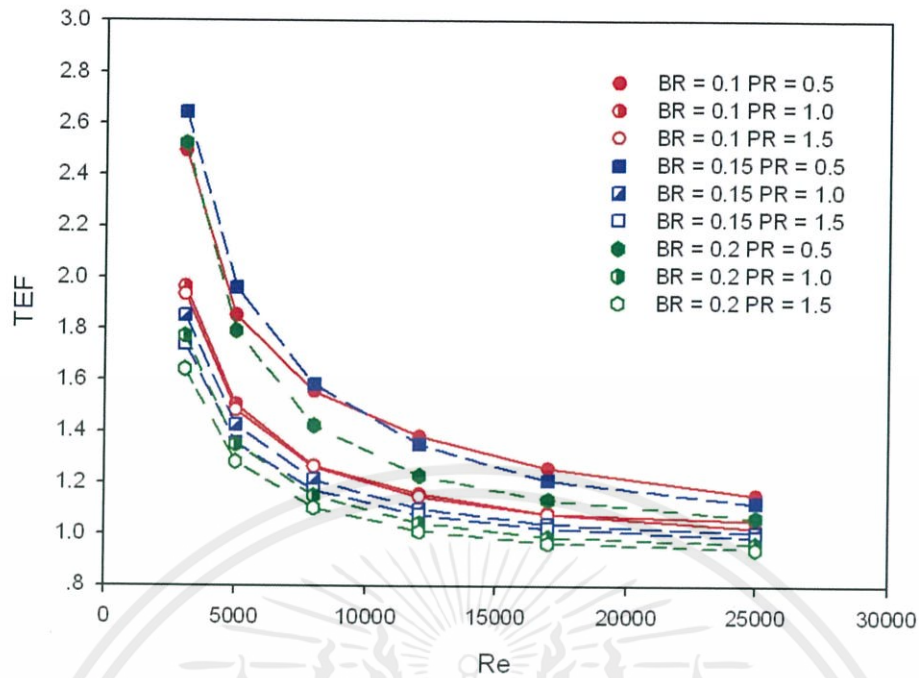


รูปที่ 6.43 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน



รูปที่ 6.44 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

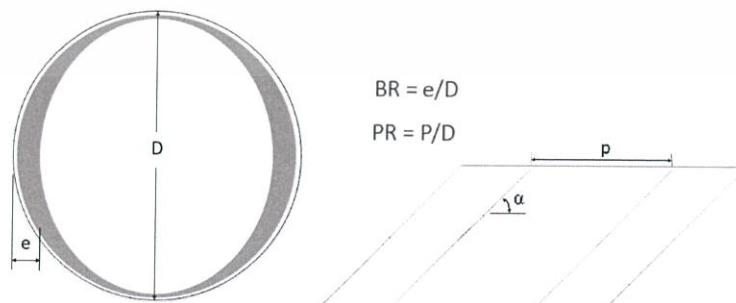
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.45 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน

## 6.7 วงแหวนวงรี (Elliptical Ring)

เนื่องจากรูปทรงวงแหวนเหลี่ยมที่ได้ทำการจำลองการไหล ไม่มีรูปร่างใดที่สามารถให้สมรรถนะทางความร้อนได้ดีกว่าวงแหวนรูปวงกลม ดังนั้นเราจึงทำการวิเคราะห์จากวงแหวนต่างๆที่ผ่านมาพบว่าวงแหวนจะได้ค่าสมรรถนะการเพิ่มทางความร้อนสูงเมื่อความหนาของวงแหวนบริเวณด้านบนและล่างมีค่าน้อย ส่วนบริเวณด้านข้างจากการสังเกตวงแหวนหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมพบว่าบริเวณด้านข้างยังมีเหลี่ยมมากจะยิ่งทำให้สมรรถนะทางความร้อนเพิ่มขึ้น จึงได้ทำการสร้างวงแหวนวงรีขึ้นโดยบริเวณด้านบนและล่างของวงแหวนมีความหนาน้อยให้คงที่ไว้ ส่วนความหนาทางด้านข้างเพิ่มลดได้ดังรูปที่ 6.46 ภายใต้เงื่อนไขเช่นเดิม คือวงรีเอียงมุม 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก  $BR = 0.10, 0.15$  และ  $0.20$  ตามลำดับ และอัตราส่วนพิตช์  $PR = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการไหลในท่อกลม

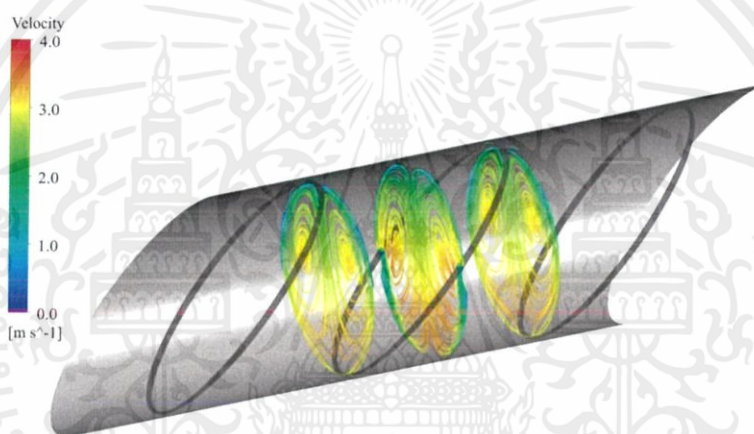


รูปที่ 6.46 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวนวงรี

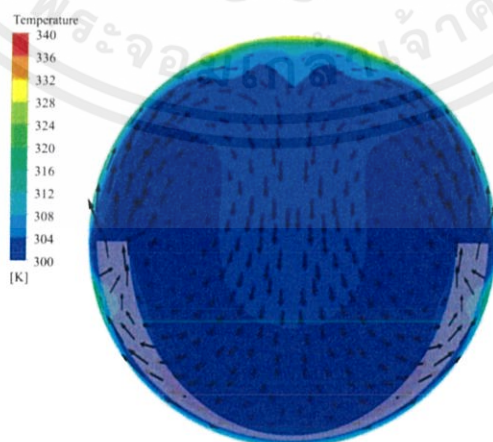
### 6.7.1 โครงสร้างการไหล

จากแผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวาง รูปที่ 6.47 จะพบว่าภายในท่อจะมีกระแสไหลวนเกิดขึ้นและพบว่ากระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจากการใส่วงวงรีนี้มีความรุนแรงของการไหลวนมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงแหวนกลมเพราะมีการขวางการไหลของของไหลที่น้อยกว่า ซึ่งทำให้ได้การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า สังเกตได้จากแผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางดังรูปที่ 6.48 พบว่า กระแสที่ไหลวนจะไหลวนได้ดีกว่าวงแหวนกลมทำให้ของไหลจากบริเวณกลางท่อสามารถไหลวนไปรับความร้อนบริเวณขอบท่อได้ดีกว่า ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่าวงแหวนกลม

จากแผนภูมิแสดงเลขนซ์เชลท์บนผนังท่อรูปที่ 6.49 จะพบว่าเลขนซ์เชลท์ที่ได้จากวงแหวนวงรีมีค่ามากกว่าวงแหวนกลม จึงสรุปได้ว่าวงแหวนกลมนั้นให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าวงแหวนเหลี่ยม ดังนั้นจึงได้สมรรถนะทางความร้อนที่สูงกว่า

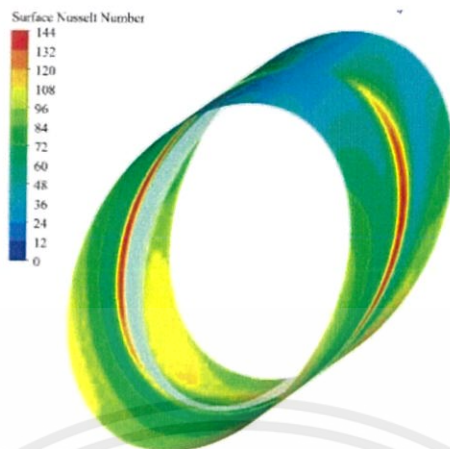


รูปที่ 6.47 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่วงวงรีด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)



รูปที่ 6.48 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางภายในท่อที่มีการใส่วงวงรีด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.49 แผนภูมิแสดงเลขนซ์เชิลท์บนผนังท่อที่มีการใส่วงวงรีด้านใน (BR=0.1, PR=1.0, Re=8000)

#### 6.7.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

จากผลที่ได้จากการจำลองการไหล เมื่อกำหนดให้มุมปะทะของวงแหวนวงรีมีค่าเท่ากับ 45 องศา และมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการบล็อก BR และอัตราส่วนพิตช์ PR เพื่อหารูปแบบของวงแหวนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

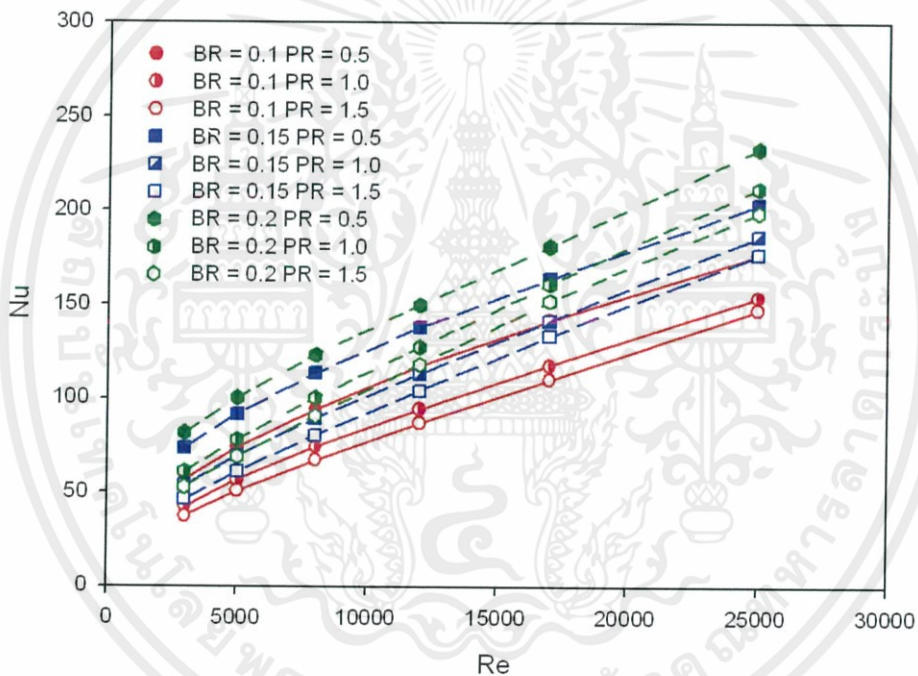
รูปที่ 6.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนวงรีใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เลขนซ์เชิลท์มีค่าเพิ่มขึ้น และเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 232.95 ที่ Re เท่ากับ 25000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนวงรีใส่อยู่ด้านในต่อเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์มีค่าน้อยลงและอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 8.14 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

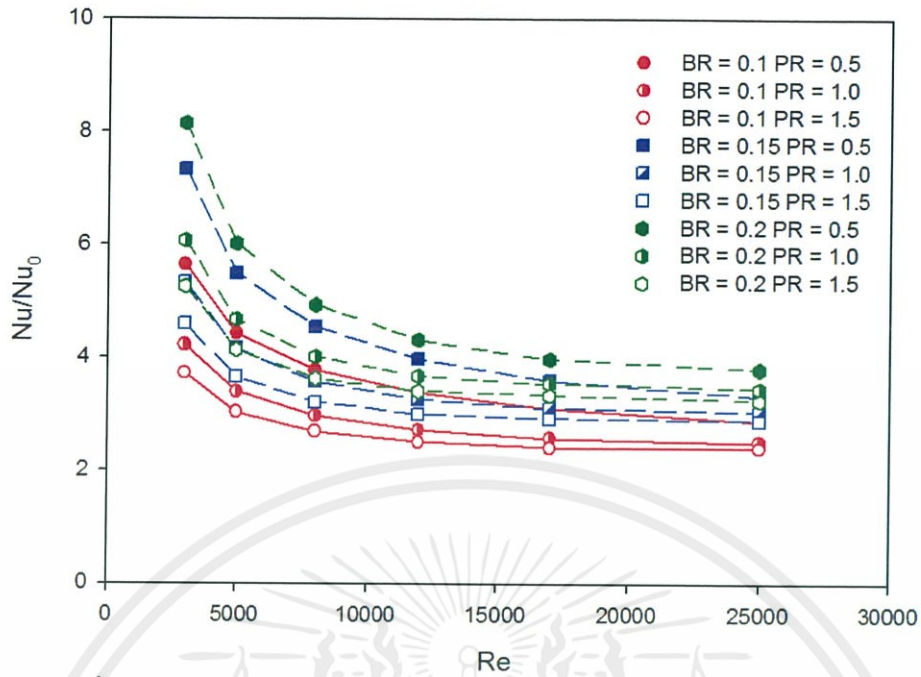
รูปที่ 6.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงรีใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 1.44 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงรีเหลี่ยมใส่ง่ายด้านในต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 41.02 ที่ Re เท่ากับ 25000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

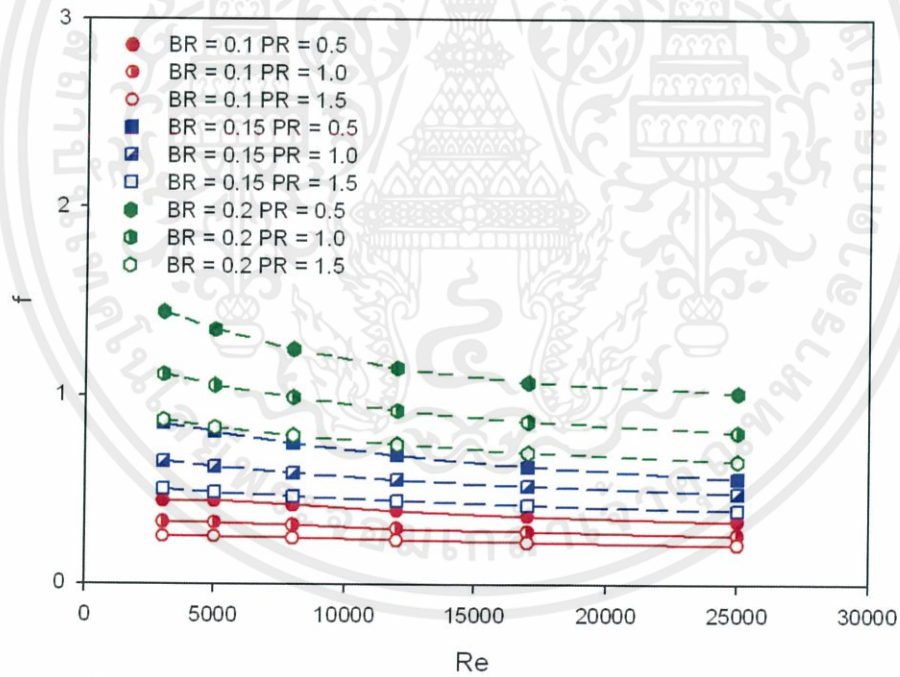
รูปที่ 6.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีวงรีเหลี่ยมใส่ง่ายด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนการบล็อก 0.10, 0.15 และ 0.20 อัตราส่วนพิตช์ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.76 ที่ Re เท่ากับ 3000, BR เท่ากับ 0.15 และ PR เท่ากับ 0.5



รูปที่ 6.50 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชิลท์

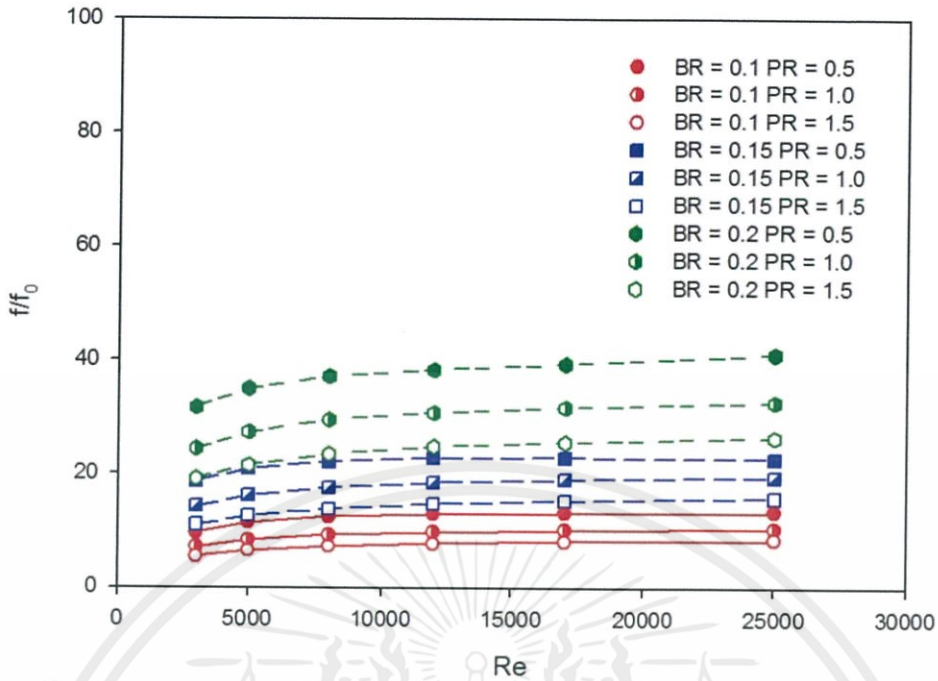


รูปที่ 6.51 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เซิลท์

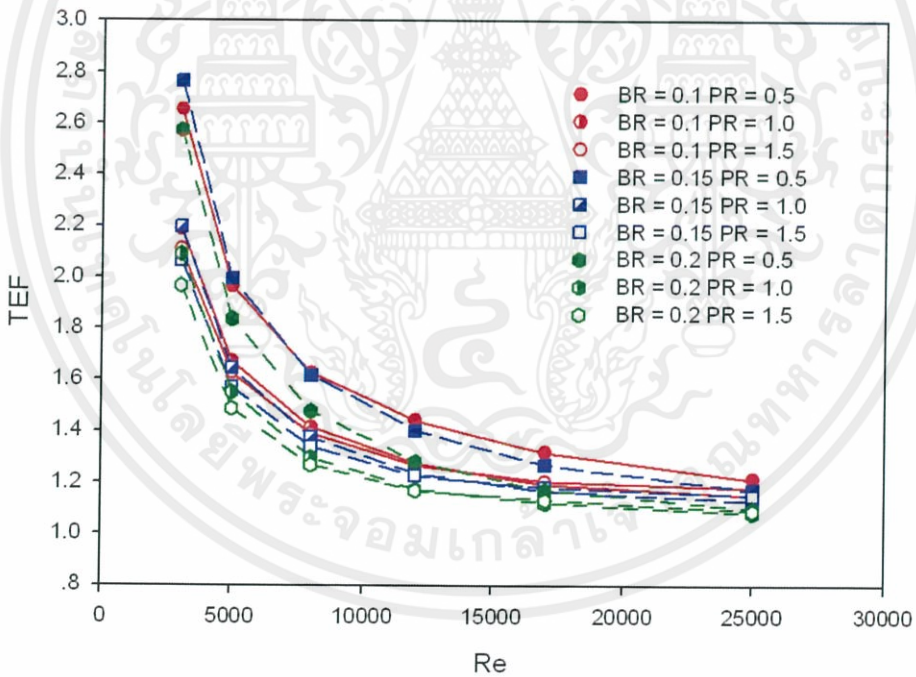


รูปที่ 6.52 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.53 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน



รูปที่ 6.54 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 7.1 สรุปผลการวิจัย

จากการจำลองการทำงานเพื่อการศึกษาเชิงตัวเลขในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมด้วยการใส่แหวนวอเทคซ์ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

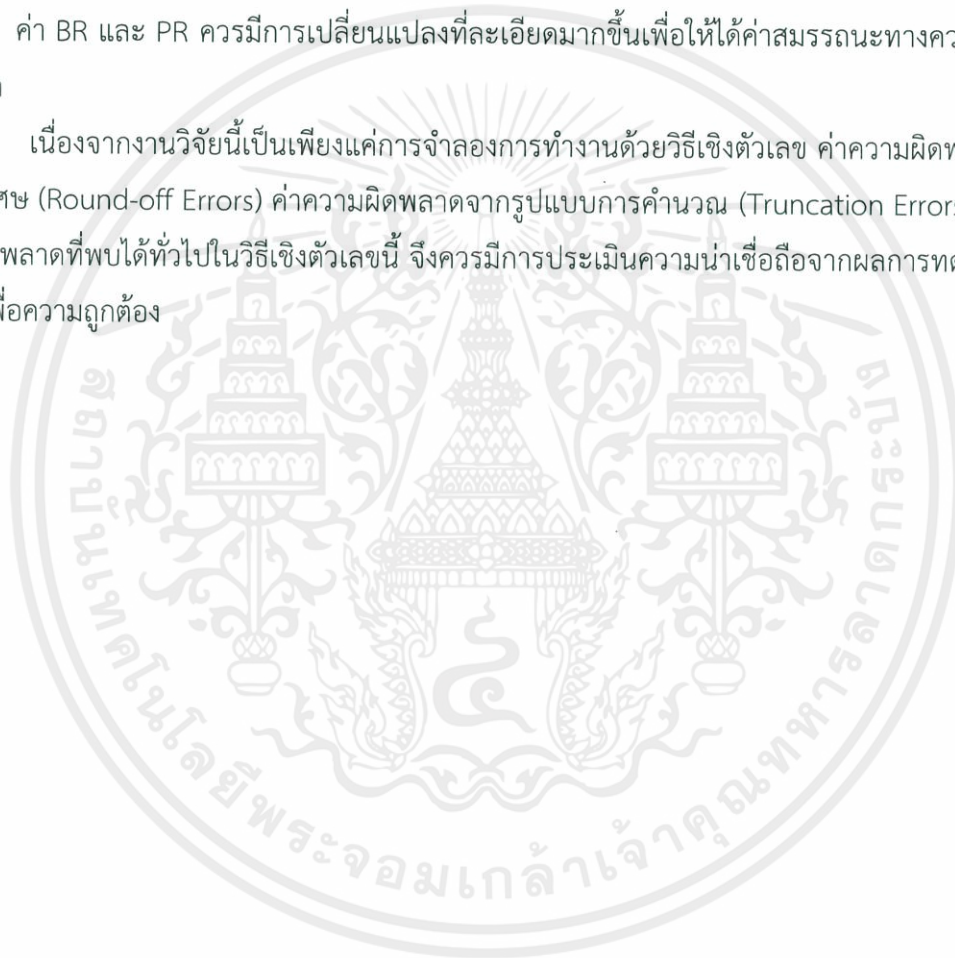
1. ท่อกลมที่มีวงแหวนใส่อยู่ด้านในจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ 2.17 ถึง 10.73 เท่า ตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็น 5.5 ถึง 116.52 เท่าและค่าสมรรถนะทางความร้อนเพิ่มขึ้นมากที่สุดเป็น 2.76 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ
2. สำหรับท่อกลมที่มีวงแหวนวงรีที่มีมุมเอียง 45 องศา  $BR = 0.1$  และ  $PR = 0.5$  จะให้สมรรถนะทางความร้อนที่ดีที่สุด
3. การใส่วงแหวนรูปร่างต่างๆสามารถสร้างกระแสไหลวนขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้มีการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมเพิ่มมากขึ้น
4. การมีวงแหวนเหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลที่อยู่ในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้

การเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเป็นผลมาจากการหมุนวนของของไหลซึ่งจะทำให้เกิดการกวาดของอนุภาคของของไหลสู่บริเวณผิวท่อกลมส่งผลให้ของไหลบริเวณผิวของท่อกลมมีการกระจายตัวดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการหมุนวนนี้จะเข้าขัดขวางการไหลของของไหลซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเสียดทานด้วยเช่นกัน

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

การจำลองการถ่ายเทความร้อนโดยการใส่วงแหวนรูปร่างต่างๆในท่อกลมที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้นอาจเป็นทางเลือกหนึ่งของการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนซึ่งอาจนำไปสู่การประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ทางด้านความร้อนโดยทั่วไปได้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อควรให้ความสนใจเกี่ยวกับการทดลองนี้อีกเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น

1. จากการทดลองนี้จะเห็นว่าสมรรถนะทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะมีค่ามากเพียงด้านล่างของท่อด้านเดียว จึงเหมาะกับอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายเทความร้อนเพียงด้านเดียวเช่น เซลล์แสงอาทิตย์
2. ค่ามุมปะทะของวงแหวนควรมีการเปลี่ยนแปลงให้หลากหลายมากขึ้นเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด
3. ค่า BR และ PR ควรมีการเปลี่ยนแปลงที่ละเอียดมากขึ้นเพื่อให้ได้ค่าสมรรถนะทางความร้อนที่มากที่สุด
4. เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นเพียงแค่การจำลองการทำงานด้วยวิธีเชิงตัวเลข ค่าความผิดพลาดจากการปัดเศษ (Round-off Errors) ค่าความผิดพลาดจากรูปแบบการคำนวณ (Truncation Errors) เป็นค่าความผิดพลาดที่พบได้ทั่วไปในวิธีเชิงตัวเลขนี้ จึงควรมีการประเมินความน่าเชื่อถือจากผลการทดลองจริงอีกครั้งเพื่อความถูกต้อง



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ผ่องศรี ศิวราศักดิ์. การถ่ายโอนความร้อน.  
กรุงเทพมหานคร : บริษัท ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น จำกัด. 2558.
- [2] มนตรี พิรุณเกษตร. กลศาสตร์ของไหล.  
กรุงเทพมหานคร : บริษัทวิทยพัฒน์ จำกัด. 2552.
- [3] 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.
- [4] W. Chingtuaytong, C. Tianpong, M. Pimsarn, P. Promvong (2016), Heat transfer characterization in a tubular heat exchanger with V-shaped rings  
Applied Thermal Engineering.
- [5] P. Promvong, N. Koolnapadol, M. Pimsarn, C. Tianpong (2014). Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings  
Applied Thermal Engineering, vol. 62, pp.285 – 292.