

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม  
ผ่านวงแหวนวอร์เท็กซ์

NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION OF TURBULENT TUBE  
FLOW THROUGH INCLINED VORTEX RINGS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-030-023

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม  
ผ่านวงแหวนวอร์เท็กซ์

NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION OF TURBULENT TUBE  
FLOW THROUGH INCLINED VORTEX RINGS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

KMITL-2018-EN-M-xxx-xxx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION OF TURBULENT TUBE  
FLOW THROUGH INCLINED VORTEX RINGS



WATCHAREE SODSRI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2018  
KMITL-2018-EN-M-xxx-xxx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมผ่านวงแหวนวอคเทคซ์

Thesis Title Numerical Heat Transfer Investigation of Turbulent Flow in Tube with Inclined Vortex Rings

นักศึกษา นางสาววัชรี สอดศรี

รหัสประจำตัว 56601169

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชินรัชช์ เอียรพงษ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-030-023

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์	
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.วิฑาตา เจษฎารัตนชัย	
ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์	
รศ.ดร.ชินรัชช์ เอียรพงษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 3 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกนอกระบบไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมผ่านวงแหวนวอคเท็กซ์
นักศึกษา	นางสาววัชรี สอดศรี
รหัสนักศึกษา	56601169
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ชินรัชช์ เจริญพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหาวิธีเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อกลมที่ติดตั้งวงแหวน(vortex rings, VRs) ที่ต่างกัน 3 รูปทรง วางทำมุมปะทะ  $30^\circ$  และ  $45^\circ$  ไปตลอดของความยาวท่อผิวเรียบ ภายใต้เงื่อนไขการถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ และของไหลที่ใช้ทดสอบเป็นอากาศไหลผ่านท่อที่เลขเรย์โนลด์ส์ตั้งแต่ 4000 – 20,000 Blockage ratio ( $B_R$ ) = 0.05, 0.1, 0.15 และ Pith ratio = 0.5, 1, 1.5 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรม ANSYS ซึ่งพบว่าหลังจากติดตั้งวงแหวนเอียงในท่อ จะก่อให้เกิดการรบกวนการไหลของอากาศและก่อให้เกิดการไหลหมุนควงสองวงที่มีความปั่นป่วนมากขึ้น ของไหลเกิดการหมุนวนจากจุดศูนย์กลางไปสู่ผนังท่อ ทำให้มีโอกาสแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลมากขึ้น พิจารณาการถ่ายเทความร้อนในเทอมของเลขนัสเซิลท์ (Nu) และการสูญเสียความดันในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) จากผลการจำลองพบว่า การติดตั้งวงแหวนเอียงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ โดยสมรรถนะความร้อนของท่อที่ใส่วงแหวน สูงสุดอยู่ที่ 2.76 ภายใต้เงื่อนไข  $B_R = 0.15$  และ Pith ratio = 0.5

คำสำคัญ – การวิเคราะห์เชิงตัวเลข; การถ่ายเทความร้อน; แหวนวอคเท็กซ์; การไหลแบบปั่นป่วน

<b>Thesis Title</b>	NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION OF TURBULENT TUBE FLOW THROUGH INCLINED VORTEX RINGS
<b>Student</b>	Miss Watcharee Sodsri
<b>Student ID.</b>	56601169
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Dr. Chinarak Thianpong
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Assoc.Prof. Dr. Pongjet Promvonge

### ABSTRACT

This project deals with a numerical study on heat transfer enhancement, proposes a new methodology to enhance the performance of 3 models vortex rings (VRs) on heat transfer augmentation in a uniform heat-fluxed tube with the assistance of a simulation program called ANSYS. In the present study, VR elements at an attack angle of 30° and 45° were mounted periodically inside the test tube. Air was employed as the test fluid with Reynolds number from 4000 to 25,000, Blockage ratio ( $B_R$ ) = 0.05, 0.1, 0.15 and Pitch ratio = 0.5, 1, 1.5. The study reveals that the insertion of VR elements can create two and four counter-rotating vortices along the tube that help increase the turbulence intensity apart from conveying the colder fluid from the core to the heated-wall region. The VR insert provides higher heat transfer and pressure drop increase than the smooth tube alone. Also, the tube fitted with VRs has higher thermal performance than the smooth tube. The highest thermal performance is 2.76 under using the 30° at  $B_R$  0.15 and  $P_R$  = 0.5 condition.

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

นางสาววัชรีย์ สอดศรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **III** หรืออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6เค้าโครงวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 แนวทางการศึกษา.....	9
บทที่ 3 สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
3.1 สมมุติฐานของการไหลและสมการควบคุม.....	10
3.2 การไหลแบบปั่นป่วนและอิทธิพลของความปั่นป่วนในสมการนาเวียร์-สโตกส์.....	11
3.3 การไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขบเบเขต.....	14
3.4 พลังงานจลน์ปั่นป่วนและการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน.....	15
3.5 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ .....	17
3.5.1 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ มาตรฐาน.....	18
3.5.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ .....	19
3.6 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ .....	22
3.6.1 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ มาตรฐาน.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6.2 แบบจำลองความปั่นป่วน SST $k-\epsilon$ .....	26
3.6.2.1 สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง SST $k-\omega$ .....	27
3.6.2.2 เงื่อนไขขอบที่ผนังของค่า $\omega$ .....	30
3.7 การวิเคราะห์บริเวณใกล้ผนังสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต.....	31
3.7.1 การจำลองการไหลใกล้ผนังด้วยวิธี enhanced wall treatment.....	32
3.7.2 การจำลองการไหลใกล้ผนังด้วยฟังก์ชันสนามเสริม.....	34
3.7.3 เงื่อนไขค่าขอบของแบบจำลองความปั่นป่วน.....	35
3.7.3.1 เงื่อนไขค่าขอบที่ผนัง .....	35
3.7.3.2 เงื่อนไขทางเข้า.....	36
3.8 การจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน.....	36
3.8.1 แบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตรฐานและแบบ $k-\omega$ .....	36
3.8.2 แบบจำลอง RNG $k-\epsilon$ .....	36
3.9 การไหลแบบภายในและการถ่ายเทความร้อน.....	37
3.9.1 สภาวะการไหล.....	37
3.9.2 ตัวประกอบความเสียหาย.....	38
3.9.3 สภาวะการถ่ายเทความร้อน.....	38
3.9.4 สภาวะการพัฒนารูปแบบสมบูรณ์เชิงความร้อน.....	39
3.9.5 ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน.....	40
3.10 การคำนวณการไหลแบบชั่วเป็นช่วง.....	40
3.10.1 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความเร็ว.....	40
3.10.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลชั่วเป็นช่วง.....	40
3.10.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลชั่วเป็นช่วง.....	40
3.10.2 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความร้อน.....	42
3.11 รูปแบบทั่วไปของสมการควบคุมการไหล.....	42
3.12 สมการแปลงรูป.....	43
3.12.1 การประมาณค่าเทอมของการพา.....	45
3.12.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลชั่วเป็นช่วง.....	45
3.12.1.2 วิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับสอง.....	46
3.12.1.3 การแปลงรูปสมการความต่อเนื่อง.....	48
3.12.1.4 การคู่ควบของความเร็วและความดัน.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ V ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.13 การหาคำตอบของสมการแปดรูป.....	50
3.14 โครงสร้างที่เชื่อมโยงกัน.....	51
บทที่ 4 การคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล.....	51
4.1 บทนำ.....	51
4.2 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	51
4.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	52
4.3.1 ชั้นก่อนประมวลผล.....	52
4.3.2 ชั้นประมวลผล.....	52
4.3.3 ชั้นแสดงผล.....	53
4.4 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	53
4.4.1 ความเข้ากันได้.....	53
4.4.2 เสถียรภาพการคำนวณ.....	53
4.4.3 การลู่เข้าของผลเฉลย.....	53
4.4.4 ความจำกัดขอบ.....	54
4.4.5 การอนุรักษ์.....	54
4.4.6 ความเสมือนจริง.....	54
4.4.7 ความแน่นอน.....	54
4.5 รูปแบบการจัดวางกริด.....	55
4.6 การดิสcretize ไรต์สมการอนุรักษ์พลังงาน.....	57
4.6.1 การดิสcretize ไรต์เทอมไม่คงตัว.....	57
4.6.2 การดิสcretize ไรต์การพา.....	58
4.6.3 การดิสcretize ไรต์เทอมการแพร่.....	59
4.7 การดิสcretize ไรต์สมการนาเวียร์-สโตกส์.....	61
บทที่ 5 การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ.....	68
5.1 บทนำ.....	68
5.2 สมการควบคุมและสมมติฐาน.....	68
5.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ.....	69
5.4 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลอง.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริด.....	70
5.4.2 การตรวจสอบแบบจำลองการปั่นป่วน.....	70
5.4.3 การตรวจสอบระยะห่างระหว่างเส้นรอบวงนอกของวงแหวนกับผิวท่อ.....	72
5.5 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย.....	73
บทที่ 6 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย.....	76
6.1 บทนำ.....	76
6.2 แหวนวงกลม.....	76
6.2.1 โครงสร้างการไหล.....	77
6.2.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	80
6.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลองเชิงตัวเลข.....	80
6.3 แหวนวงรี.....	88
6.3.1 โครงสร้างการไหล.....	88
6.3.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	91
6.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลองเชิงตัวเลข.....	98
6.4 วงแหวนพับ.....	99
6.4.1 โครงสร้างการไหล.....	99
6.4.2 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	100
6.4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองเชิงตัวเลข.....	103
6.5 การอภิปรายผลงานวิจัย.....	106
6.5.1 อิทธิพลจากอัตราส่วนพื้นที่การขวางการไหล.....	106
6.5.2 อิทธิพลของอัตราส่วนค่าพิตซ์.....	107
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	108
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	108
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	109

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 แสดงลักษณะรูปร่างของวงแหวนแต่ละกรณีศึกษา.....	73
6.1 แสดงผลจากการติดตั้งแหวนวงกลมแต่ละมุม.....	87
6.2 แสดงผลจากการติดตั้งแหวนวงรีแต่ละมุม.....	98
6.3 แสดงผลจากการติดตั้งวงแหวนแต่ละมุม.....	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **VIII** อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทดลองใส่แหวนวงกลมในท่อ.....	7
2.2 การทดลองใส่แหวนวงกลมเอียงในท่อ.....	8
2.3 การทดลองใส่วงแหวนพับริฐรูปตัววีในท่อ.....	8
3.1 ตัวอย่างของรูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง.....	41
3.2 ปริมาตรควบคุมสำหรับใช้อธิบายสมการแปลงรูป.....	44
3.3 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ.....	46
4.1 ความเชื่อมโยงของกระบวนการติสเครทท์ไทด์และผลเฉลยประมาณค่า.....	52
4.2 แนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ.....	55
4.3 การจัดวางกริดแบบโครงสร้างปกติ.....	55
4.4 การจัดวางกริดแบบไม่เป็นโครงสร้าง.....	56
4.5 ส่วนแรเงาแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ.....	56
4.6 การกระจายตัวของความดันกระเพื่อมหรือปัญหากระดานหมากรุก.....	62
4.7 การจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนในสองมิติ.....	63
4.8 เวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาเยล.....	65
4.9 เวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาวีเซล.....	66
5.1 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของท่อและวงแหวน.....	68
5.2 แบบจำลองสามมิติของท่อกลมที่มีวงแหวนวอคเท็กซ์ด้านใน.....	69
5.3 แบบจำลองสามมิติของท่อกลมที่มีวงแหวนวอคเท็กซ์ด้านในแบบ 1 โมดูล.....	70
5.4 ลักษณะกริดอิสระที่ใช้ในการจำลองการไหลสามมิติ.....	70
5.5 กราฟระหว่าง Nu กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับแบบจำลองการปั่นป่วนแต่ละรูปแบบ.....	71
5.6 กราฟระหว่าง f กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับแบบจำลองการปั่นป่วนแต่ละรูปแบบ.....	71
5.7 กราฟระหว่าง Nu กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับการแบบจำลอง โดยใช้ช่องว่างเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร.....	72
5.8 กราฟระหว่าง f กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับการแบบจำลอง โดยใช้ช่องว่างเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร.....	72
6.1 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของแหวนวงกลม.....	77
6.2 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่ของแหวนวงกลมด้านใน.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวาง ภายในท่อที่มีการใส่ของแหวนวงกลมด้านใน.....	79
6.4 แผนภูมิแสดงเลขน้ชเชลท์บนผนังท่อที่มีการใส่แหวนวงกลมด้านใน.....	80
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขน้ชเชลท์มุม 30 องศา.....	82
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขน้ชเชลท์มุม 45 องศา.....	83
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขน้ชเชลท์มุม 30 องศา.....	83
6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขน้ชเชลท์มุม 45 องศา.....	84
6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานมุม 30 องศา.....	84
6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน 45 องศา.....	85
6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมุม 30 องศา.....	85
6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมุม 45 องศา.....	86
6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนมุม 30 องศา.....	86
6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนมุม 45 องศา.....	87
6.15 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของแหวนวงรี.....	88
6.16 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่ของแหวนวงรีด้านใน.....	89
6.17 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวาง ภายในท่อที่มีการใส่ของแหวนวงรีด้านใน.....	90
6.18 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิตั้งแต่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนวงรีด้านใน.....	91
6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขน้ชเชลท์มุม 30 องศา.....	93
6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขน้ชเชลท์มุม 45 องศา.....	94
6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขน้ชเชลท์มุม 30 องศา.....	94
6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขน้ชเชลท์มุม 45 องศา.....	95
6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานมุม 30 องศา.....	95
6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน 45 องศา.....	96
6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมุม 30 องศา.....	96
6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมุม 45 องศา.....	97
6.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนมุม 30 องศา.....	97
6.28 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนมุม 45 องศา.....	98
6.29 ภาพด้านหน้าและภาพด้านข้างแสดงลักษณะของวงแหวนพับ.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ X ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.30 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่ของวงแหวนพับด้านใน.....	100
6.31 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวาง ภายในท่อที่มีการใส่ของวงแหวนวงรีพับด้านใน.....	100
6.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชิลท์มูม 30 องศา.....	101
6.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์มูม 30 องศา.....	102
6.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานมูม 30 องศา.....	102
6.35 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมูม 30 องศา.....	103
6.36 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนมูม 30 องศา.....	103
6.37 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนของวงแหวนแต่ละแบบ.....	104
6.38 กระแสเหนี่ยวนำการไหลที่เกิดจากการติดตั้งแหวนแต่ละแบบ.....	105
6.39 ความสัมพันธ์ของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนวงรี.....	106
6.40 ความสัมพันธ์ของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนวงรี.....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รายการคำย่อและสัญลักษณ์

## สัญลักษณ์ คำจำกัดความ (หน่วย SI)

a	ค่าสัมประสิทธิ์ของจุดต่อ
A	พื้นที่การถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )
AR	สัดส่วนความกว้างต่อความสูงของท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือช่องขนาน
B	ค่าคงที่จากการทดลองในกฎของผนัง
BR	อัตราส่วนความสูงแผ่นกั้นหรือแหวน
c	เซลล์
c	ระยะลอยตัว
CR	อัตราส่วนระยะลอยตัว
$c_p$	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ( $J/(kg \cdot K)$ )
$c_v$	ความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ ( $J/(kg \cdot K)$ )
D	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อกลมหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)
$D_h$	เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก (mm)
e	ความสูงแผ่นกั้นหรือแหวน (mm)
f	ค่าตัวประกอบเสียดทาน
F	ฟังก์ชันการรวมกัน (Blending function)
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/(m^2 \cdot K)$ )
H	ความสูงของท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือช่องขนาน ความกว้างของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส (mm)
i	พลังงานภายใน ( $J/kg$ )
I	กระแสไฟฟ้า (A)
J	สัมประสิทธิ์ของเมทริกซ์
k	ค่าการนำความร้อน ( $W/(m \cdot K)$ )
k	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนต่อหน่วยมวล ( $J/kg$ )
K	พลังงานจลน์เฉลี่ย (Mean kinetic energy)
$l$	สเกลความยาว
L	ความยาวหรือความยาวคาบ (mm)
n	จำนวนสมาชิกตัวที่ n
N	จำนวนสมาชิกของเซต จำนวนตัวอย่าง
Nu	ค่าเลขนัสเซลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **XII** อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

### สัญลักษณ์กรีก

$\alpha$	เลขพหุคูณของผลคูณมุมปะทะหรือมุมเอียงของแผ่นกั้นที่ทำมุมกับแนวการไหล (degree)
$\Gamma$	สัมประสิทธิ์ของการแพร่
$\varepsilon$	อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเนื่องจากความหนืด ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ )
$\kappa$	Von Kármán constant
$\mu$	ค่าความหนืดพลวัต (Pa·s)
$\nu$	ค่าความหนืดจลน์ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\rho$	ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\sigma$	เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ
$\tau$	ความเค้นเฉือน (Pa, $\text{N}/\text{m}^2$ )
$\varphi$	ค่าคุณสมบัติของการไหล (Flow property)
$\phi$	ค่าคุณสมบัติใดๆ
$\Omega$	เทนเซอร์ค่าเฉลี่ยของอัตราการหมุน ( $\text{S}^{-1}$ )

### ตัวห้อย

air	อากาศ
b, bulk	ของไหล
bs	blue start
conv	การพาความร้อน
CV	ปริมาตรควบคุม
eff	ค่ายังผล
e, w, n, s	ผิวหน้าของปริมาตรควบคุมระหว่างจุดต่อ P และ E, P และ W P และ N, P และ S
E, W, N, S, P	จุดต่อด้านตะวันออก ตะวันตก เหนือ ใต้ และกึ่งกลาง
EE, WW	จุดต่อทางด้านท้ายและต้นกระแสน้ำ
Exp	ค่าที่ได้จากการทดลอง
f, face	ผิวหน้าเซลล์
i, j, l, j	สัญลักษณ์บ่งชี้ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian indices)

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

### ตัวยก

+	Sublayer-scaled value
'	ค่าผันแปร (Fluctuating quantity)
*	ค่าปัจจุบันของตัวแปรที่อยู่ในกระบวนการการทำซ้ำ
-	ค่าเฉลี่ย
new	ค่าที่ถูกปรับปรุง

### สัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์

$d/dx$	อนุพันธ์เทียบกับตัวแปร $x$ (Derivative with respect to $x$ , $m^{-1}$ )
$d/dt$	อนุพันธ์ย่อยเทียบกับเวลา (Partial time derivative operator, $s^{-1}$ )
$\nabla\phi$	เกรเดียนต์ของค่าคุณสมบัติ

### คำย่อ

GCI	Grid convergence index
QUICK	Quadratic upstream interpolation for convective kinetics
RNG	Renormalization-group
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
LCT	Liquid Crystal Thermography technique
TLC	Thermochromic Liquid Crystals

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นในอุตสาหกรรม ตั้งแต่ขนาดเล็กจนไปถึงขนาดใหญ่ ด้านอุตสาหกรรมได้นำเอาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาประยุกต์ใช้ในระบวมามากมายทั้งมีการแข่งขันและพัฒนาสินค้าหรือผลิตภัณฑ์มากขึ้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงต้องมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย เทคโนโลยีในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจึงสำคัญอย่างยิ่งยวดต่อการออกแบบและประยุกต์ใช้งานได้อย่างมากมาย อาทิ เช่น เครื่องอบแห้ง เต่าเผา เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แผงระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องทำความเย็น เครื่องกลั่น เครื่องควบแน่น เครื่องยนต์ เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิตต่างๆ ในอุตสาหกรรม เป็นต้น หลักการออกแบบอุปกรณ์หรือระบบที่มีการถ่ายเทหรือแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่ต้องการ เช่น สามารถทำงานได้ตามความต้องการ ต้นทุนที่คุ้มค่า สมรรถนะในการถ่ายเทและแลกเปลี่ยนความร้อนสูง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด อายุการใช้งานที่ยืนยาว การบำรุงรักษาซ่อมแซมไม่ยุ่งยาก รวมทั้งมีความน่าเชื่อถือและปลอดภัยสูง เพื่อให้บรรลุคุณลักษณะที่ต้องการเหล่านี้ พื้นฐานสำคัญคือการพัฒนาขีดความสามารถและศักยภาพของระบบถ่ายเทความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเพื่อลดการใช้พลังงาน และขนาดที่เหมาะสมกะทัดรัดนั้นทำให้ลดการใช้วัสดุและพื้นที่ติดตั้งใช้งาน ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน เพราะการจัดสรรทรัพยากรเชื้อเพลิงและวัสดุได้อย่างคุ้มค่าสูงสุด

โดยเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 วิธี วิธีแรก คือ แอคทีฟ เมธอด (Active method) ซึ่งต้องใช้กำลังจากภายนอก เช่น การช่วยเหลือเชิงกล, การฉีดและการดูดของไหลและการใช้สนามไฟฟ้าสถิตย์ ส่วนอีกวิธีคือ แพสซีฟ เมธอด (Passive method) ที่ไม่ต้องใช้กำลังจากภายนอก โดยปกติแล้ววิธีแพสซีฟ เมธอด (Passive method) เป็นวิธีที่นิยมมากกว่า ซึ่งวิธีนี้ประกอบไปด้วย การชุบเคลือบผิวท่อ, การกดผิวท่อ, ผิวท่อที่ขรุขระ, ผิวที่ยื่นออกมา, ท่อเกลียว, สารเติมแต่งสำหรับของเหลวและก๊าซ, เทอร์บูเลเตอร์(ขดลวดและวงแหวนทรงกรวย) และเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน อุปกรณ์ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบแพสซีฟ (Passive) ที่สำคัญและมักถูกใช้เพื่อสร้างกระแสไหลวนในระบบความร้อน

การใช้ตัวสร้างการไหลปั่นป่วน (Turbulators) เป็นอีกวิธีหนึ่งของวิธี passive เนื่องจากการสอดใส่หรือติดตั้งอุปกรณ์เข้าไปในช่องทางการไหล ได้แก่ ขดลวด (wire coils) แหวนแบบกรวย (conical ring) แผ่นบิด (twisted tape) ปีก (winglet) เป็นต้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลหมุนวนหรือเกิดการไหลอันดับสอง (secondary flow) [1] ตัวสร้างการไหลปั่นป่วนได้ถูก

นำไปใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างหลากหลายรูปแบบ เพราะเมื่อใส่ตัวสร้างการไหลปั่นป่วนเข้าไปในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการไหลเกิดการไหลแบบปั่นป่วนอย่างรุนแรง

การศึกษาศักยภาพการถ่ายเทความร้อนของตัวสร้างการไหลปั่นป่วนแต่ละชนิดเป็นไปอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ซึ่งในบทความนี้พิจารณาตัวสร้างความปั่นป่วนเพียง 1 ชนิดคือ วงแหวน (rings) วงแหวน เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลแบบย้อนกลับ (reverse flow device) ส่งผลให้เกิดการไหลแบบย้อนกลับและ ทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและการถ่ายเทโมเมนตัมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นแต่จะเกิดการสูญเสียความดันเพิ่มตามมา

เนื่องจากระบบท่อจริงในทางอุตสาหกรรมมีความยาวมากจึงมีผู้นำเสนอหลักการของการไหลที่มีการปรับตัวเต็มที่ในท่อ (fully develop) และมีการไหลแบบเป็นคาบ (periodic) ที่ทำการศึกษาโดย Eiamsa-ard และคณะ [3] การวิจัยของ Ozceyhan และคณะ [4] ได้ศึกษาเชิงตัวเลขของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งได้รับผลกระทบจากช่องว่างระหว่างวงแหวนกลมกับผนังท่อ การศึกษาได้ข้อสรุปว่าเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี วงแหวนกลม (circular ring) ไม่ควรวางติดกับผิวท่อ ซึ่งข้อสรุปนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Akansu [5] ซึ่งได้ศึกษาและวิเคราะห์การไหลบนเงื่อนไขของระยะห่างต่างๆ ระหว่างตัวสร้างการไหลปั่นป่วน (porous rings) กับผนังท่อ และระยะพิตซ์ที่ต่างกัน ได้ข้อสรุปว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน จะเพิ่มขึ้นเมื่อลดพื้นที่ของวงแหวนลง ต่อมา Promvong และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบในท่อจัดรัศมีที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นเอียงมุม  $45^\circ$  บนผนังด้านหนึ่งของท่อ จากการศึกษพบว่าแผ่นกั้นวางเอียงทำให้เกิดการไหลหมุนวนแบบคู่ซึ่งกระแสการไหลที่หมุนวนนี้จะไปกระแทกส่วนที่เป็นผนังท่อทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน พบว่าการติดตั้งวัตถุเข้าไปในท่อเพื่อขวางการไหล มีผลช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบไม่มีการใส่ตัวสร้างการไหลปั่นป่วน อัตราส่วนระยะพิตซ์และอัตราส่วนการกั้นการไหลที่ค่าต่างกัน ล้วนส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเช่นกัน

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อกลมที่มีการใส่วงแหวนเข้าไป โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรมแอนซิส (ANSYS 17.2) เพื่อที่จะศึกษาและปรับปรุงรูปทรงต่างๆของวงแหวน ให้มีสมรรถนะความร้อนที่สูงขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

### 1.2.1 เพื่อศึกษางานวิจัยโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2 เพื่อศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหลการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อมและสมรรถนะเชิงความร้อนของการไหลภายในท่อกลมที่มีการใส่แหวนเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

1.2.3 เพื่อพัฒนาและปรับปรุงการใส่แหวนในท่อกลมรูปแบบต่างๆ นำไปสู่การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน, การลดค่าตัวประกอบเสียดทานและการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ทำการศึกษาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) โดยศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในรูปของตัวเลขนซ์เซลล์์ และค่าตัวประกอบเสียดทาน

1.3.2 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ

1.3.3 คุณสมบัติของของไหลคงที่

1.3.4 ศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 4000 ถึง 20,000

1.3.5 พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ

1.3.6 ทำการวิจัยเฉพาะท่อกลมที่มีการให้ความร้อนที่ผนังแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ที่ 600 วัตต์ต่อตารางเมตร

1.3.7 ไม่คำนึงถึงผลของการแผ่รังสีความร้อน

1.3.8 เทอมของการพาใช้การคำนวณแบบควิก (QUICK)

1.3.9 การคำนวณของความเร็วและความดันใช้กระบวนการวิธีแบบซิมเปิล (SIMPLE)

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ของของไหลภายในท่อกลมเพื่อทำการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัย

1.4.2 กำหนดรูปร่างของแหวนวอเทคซ์และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนโปรแกรมพร้อมกับการเลือกขนาดและจำนวนกริดที่เหมาะสม

1.4.3 ตรวจสอบโปรแกรมโดยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองการไหลกับผลที่ได้จากการทดลอง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองการไหล นำข้อมูลมาแสดงค่าในรูปแบบพารามิเตอร์ไว้หน่วยและแสดงผลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีสมรรถนะทางความร้อนที่สูงขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในเชิงของภาคอุตสาหกรรม
- 1.5.2 สามารถนำหลักการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนไปช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงได้
- 1.5.3 เป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติม

## 1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วยบท ต่างๆ ดังนี้ บทที่ 1 เป็นการกล่าวนำเพื่อให้เข้าใจถึงที่มาของการวิจัย ขอบเขตของการศึกษา รูปแบบของการศึกษา ขั้นตอนการศึกษา และประโยชน์จากการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 ได้เขียนกล่าวนำเสนองานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยติดตั้งอุปกรณ์และรูปแบบการจัดวางที่ต่างกัน

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความดัน ตกคร่อม สมรรถนะเชิงความร้อน เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและทำความเข้าใจในการวิจัยครั้งนี้

บทที่ 4 อธิบายรูปแบบการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

บทที่ 5 อธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และนำเสนอผลที่ได้จากการศึกษาแบบจำลอง

บทที่ 6 นำเสนอและอภิปรายผลจากการติดตั้งอุปกรณ์แต่ละแบบ

บทที่ 7 สรุปผลจากการศึกษาทั้งหมดและข้อเสนอแนะต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทรรศน์

จากเนื้อหาในบทนำที่ผ่านมา ได้นำมาสู่เนื้อหาในบทนี้ซึ่งกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวสร้างความปั่นป่วน ที่มีการปรับปรุงตัววางกระแสการไหลในรูปแบบต่างๆ เพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน จากผลงานของนักวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ซึ่งได้มีการศึกษาทั้งการทดลอง และการคำนวณเชิงตัวเลข หรือใช้ทั้งสองวิธีวิเคราะห์ร่วมกัน โดยเน้นถึงงานวิจัยที่ได้ศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายของการไหลผ่านตัววางการไหลรูปร่างต่างๆ ในท่อแบบต่างๆ ตั้งแต่การใช้แผ่นกั้นการไหล วงแหวนขวางการไหล ไปจนถึงแผ่นกั้นรูปตัววี เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านวงแหวนและวงแหวนพับในท่อกลมต่อไป

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Patankar et al. (1977) เป็นผู้ริเริ่มศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์การไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อ โดยจากการศึกษาพบว่าท่อที่ไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์มีพฤติกรรมการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกันและซ้ำกันทุกๆ โมดูล

Berner et al. (1984) ศึกษาผลของการกระจายตัวของความเร็วและลักษณะการไหลปั่นป่วนของของไหลที่มีการติดตั้งกลุ่มแผ่นกั้นในท่อ ผลจากการศึกษาพบว่าท่อที่มีการเพิ่มแผ่นกั้น จะเกิดการสลัดของกระแสวน (vortex shedding) ที่เลขเรย์โนลด์มากกว่า 600 ส่วนช่วงการไหลที่ค่าเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 600 อยู่ในช่วงการสลัดของกระแสวนอิสระ (free vortex shedding) สำหรับช่วงการไหลราบเรียบ

Webb and Ramadhyani (1985) ได้นำแนวคิดการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงของ Patankar et al. (1977) มาศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหลขนาน ที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นโดยมีการจัดวางแบบเอียง

Ooi et al. (2002) ได้ศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของสนามการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางไหล 2 มิติ โดยเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน 2-layer  $k-\epsilon$ ,  $S-A$  และ  $v^2-f$  ซึ่งพวกเขาได้สรุปว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง ในขณะที่  $S-A$  ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า และแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $v^2-f$  ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด แต่มี

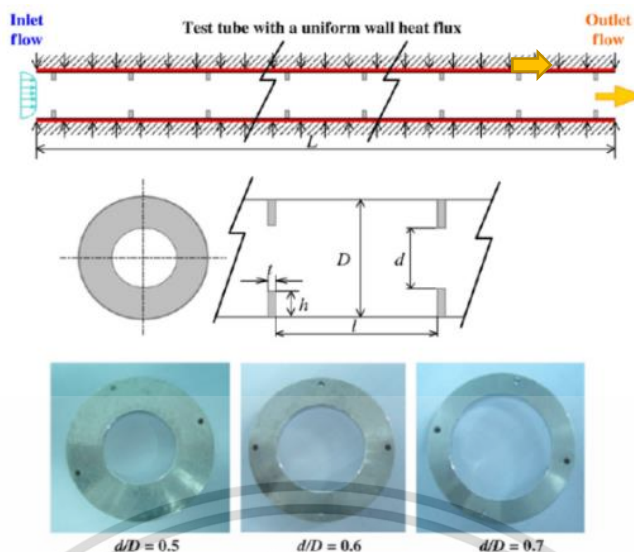
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดอ่อนคือ ให้ค่าเลขนัสเซลล์ที่ไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง ที่บริเวณใกล้ๆ ครีบซึ่งมีการไหลชั้นที่สองเกิดขึ้น

Yilmaz (2003) ศึกษาผลของแผ่นกั้นเดี่ยวที่ทางเข้าต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อม แผ่นกั้นถูกติดตั้งที่ผิวด้านบนของท่อที่มีการให้ความร้อนแบบพลิกซ์ความร้อนคงที่ แผ่นกั้นมีค่าอัตราส่วนการวางที่แตกต่างกัน 2 ค่า และมุมปะทะของของไหล 4 มุม ศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 7100-28,500 จากผลการทดลองพบว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงในรูปของเลขนัสเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น 1.39-2.43 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่า เมื่อค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นค่าความดันตกคร่อมก็เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยพบว่าค่าความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มมากขึ้นเท่ากับ 28.26-94.45 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า เมื่อพิจารณาถึงค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม ในรูปของค่าสมรรถนะที่ได้จากการเพิ่มแผ่นกั้นเดี่ยวที่ทางเข้าของท่อ สรุปได้ว่าแผ่นกั้นเดี่ยวที่ทางเข้าไม่เป็นประโยชน์ต่อค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ถึงแม้ว่าจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น แต่ก็ให้ค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้นในอัตราส่วนที่มากกว่าค่าการถ่ายเทความร้อนมาก

Akansu (2006) ซึ่งได้ศึกษาและวิเคราะห์การไหลบนเงื่อนไขของระยะห่างต่างๆ ระหว่างตัวสร้างการไหลปั่นป่วน (porous rings) กับผนังท่อ และระยะพิตช์ที่ต่างกัน ได้ข้อสรุปว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน จะเพิ่มขึ้นเมื่อลดพื้นที่ของวงแหวนลง

Kongkaitpaiboon et al. (2010) ได้ทำการทดลองโดยติดตั้งวงแหวนเข้าไปในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ทดลองที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ใช้เลขเรย์โนลด์มีค่าตั้งแต่ 4000 จนถึง 20,000 มีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter ratio) และ อัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) จากผลการทดลองพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการที่ใส่วงแหวนเข้าไปในท่อมามีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 57% ถึง 195% เมื่อเทียบกับท่อเปล่า นอกจากนี้ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าวงแหวนที่มีค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter ratio) และ ค่าอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) น้อยที่สุดจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันลดมากที่สุด

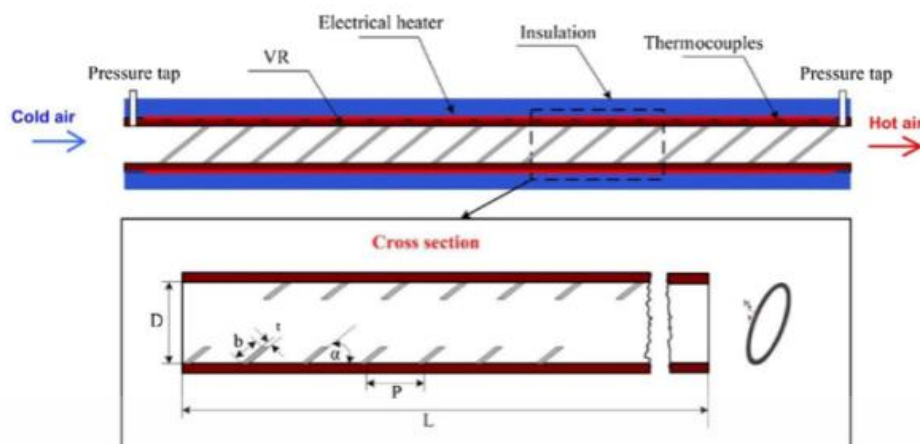


รูปที่ 2.1 การทดลองใส่แสงแหวนกลมในท่อ (Kongkaitpaiboon et al. (2010))

Promvong et al. (2013) ได้ทำการศึกษาวิจัยโดยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบในท่อจัดรัศมีที่มีการติดตั้งแผ่นกันเอียงมุม  $45^\circ$  บนผนังด้านหนึ่งของท่อ จากการศึกษาพบว่าแผ่นกันวางเอียงทำให้เกิดการไหลหมุนวนแบบคู่ซึ่งกระแสน้ำที่หมุนวนนี้จะไปกระแทกส่วนที่เป็นผนังท่อทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน พบว่าการติดตั้งวัตถุเข้าไปในท่อเพื่อขวางการไหล มีผลช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบไม่มีการใส่ตัวสร้างการไหลปั่นป่วน อัตราส่วนระยะพิทช์และอัตราส่วนการกั้นการไหลที่ค่าต่างกัน ล้วนส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเช่นกัน

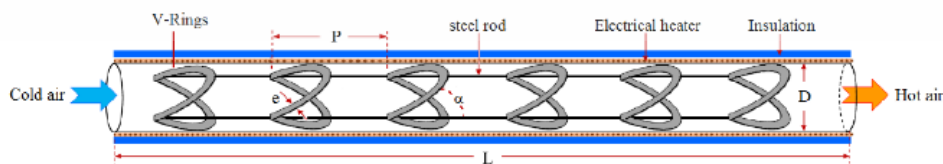
Promvong et al. (2016) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะความร้อนของท่อโดยการใส่แสงแหวนเอียง 30 องศาเข้าไปในท่ออย่างต่อเนื่อง โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบในท่อทดลองตั้งแต่เลขเรย์โนลด์มีค่า 5000 จนถึง 26,000 ในการทดลองยังมีการเปลี่ยนแปลงอัตราค่าส่วนการขวาง (Blockage ratio) และ อัตราค่าส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงและแนวโน้มของการถ่ายเทความร้อนและการเกิดความดันลด จากผลการศึกษาพบว่า จากกาติดตั้งวงแหวน ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้ของไหล ความดันลดลงมากเมื่อเทียบกับท่อเรียบธรรมดา ค่าอัตราส่วนการขวาง (Blockage ratio) แปรผันตรงกับค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ในขณะที่ค่าอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) ให้ผลตรงกันข้าม อย่างไรก็ตามเมื่อใช้วงแหวนเอียงโดยที่ค่าอัตราส่วนการขวาง (Blockage ratio) = 0.1 และค่าอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) = 0.5 จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การทดลองใส่วงแหวนกลมเอียงในท่อ (Promvong et al.(2016))

Chingtuaythong et al. (2016) ได้ทดลองโดยการใส่วงแหวนรูปตัว V ลงในท่อที่มีการให้ความร้อนคงที่ในลักษณะด้านการไหล ในการทดลองนี้ได้ติดตั้งวงแหวนรูปตัว V เอียงทำมุม 30 องศา ลงในท่อ แล้วเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนค่าระยะห่าง (Pitch ratio) และ อัตราส่วนค่าการขวาง (Blockage ratio) โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบในการทดสอบ ทำการทดลองตั้งแต่เลขเรย์โนลด์ที่ 5000 จนถึง 25000 จากผลการทดลองพบว่า วงแหวนรูปตัว V สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้เป็น 5.8 เท่า และในขณะที่เดียวกันตัวประกอบความเสียดทานก็เพิ่มขึ้นถึง 82 เท่า เมื่อเทียบกับท่อปกติ การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนค่าการขวาง (Blockage ratio) ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนค่าระยะห่าง (Pitch ratio) ให้ผลตรงกันข้าม อย่างไรก็ตามจากผลการทดลอง อัตราส่วนค่าระยะห่าง (Pitch ratio) และ อัตราส่วนค่าการขวาง (Blockage ratio) ที่ให้สมรรถนะสูงสุดคือ 1.0 และ 0.1 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับอุปกรณ์อื่นๆ เช่น วงแหวนเอียง, ขดลวด, และเทปเกลียว แล้ว การติดตั้งวงแหวนรูปตัว V จะให้สมรรถนะทางความร้อนที่สูงกว่า



รูปที่ 2.3 การทดลองใส่วงแหวนพับริ้วใน (Chingtuaythong et al. (2016))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 แนวทางการศึกษาวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ส่วนใหญ่สามารถสรุปได้ว่าการใส่ตัวขวางการไหลในท่อกลมสามารถสร้างความปั่นป่วนให้กับกระแสการไหลได้ แต่ที่น่าสนใจคือการใส่ตัวขวางการไหลแบบวงแหวน เนื่องจากให้ผลการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีและยังไม่มีความหลากหลายทางกรณีศึกษามากนัก จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นสาเหตุหลักในการศึกษางานวิจัยต่อไปโดยการใช้วงแหวนรูปทรงต่างๆใส่เข้าไปในท่อกลมเป็นหลัก เพื่อดูว่าวงแหวนรูปร่างไหนทำให้เกิดกระแสการไหลเป็นอย่างไร ส่งผลต่อค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าเลขนัสเซลท์ รวมไปถึงค่าอื่นๆที่เป็นตัวแปรหลักในการทำวิจัยอย่างไร และหลังจากนั้นจึงจะทำการปรับปรุงรูปแบบของวงแหวนเพื่อเป็นการลดค่าตัวประกอบเสียดทานลง เพื่อหารูปทรงของแหวนที่ทำให้เกิดอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุด เมื่อได้ผลจากการติดตั้งวงแหวนรูปทรงต่างๆที่เงื่อนไขต่างๆ ในท่อกลมแล้ว จะสามารถเป็นแนวทางเพื่อให้ผู้ใช้งานใช้ในการตัดสินใจเลือกตัวขวางการไหลได้ตามความเหมาะสม เป็นประโยชน์ในเชิงการเพิ่มองค์ความรู้ใหม่และเป็นข้อมูลเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีต่อไปในอนาคตสำหรับผู้สนใจ ออกแบบ ปรับปรุง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อให้เกิดประโยชน์จากการใช้ทรัพยากรอย่างสูงสุด

## บทที่ 3

# สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของของไหลและสมการพลังงานเพื่อวิเคราะห์ปัญหาของการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมหรือไฟไนต์วอลุ่ม ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์ที่จำหน่ายกันอยู่ในระดับสากลและเป็นที่ยอมรับกันมากในปัจจุบัน โดยสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาการไหลผ่านรูปทรงที่มีความซับซ้อนได้ดี

### 3.1 สมมุติฐานของการไหลและสมการควบคุม

การคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อน ที่มีการติดตั้งครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีสมมุติฐานของการไหลดังนี้

- (1) เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้
- (2) การไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- (3) เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วง
- (4) สมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่
- (5) ไม่พิจารณาแรงวัตถุ

สมการควบคุมการไหลประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม (หรือเรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์) และสมการพลังงาน เมื่อพิจารณาภายใต้สมมุติฐานข้างต้น สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

**สมการความต่อเนื่อง**

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (3.1)$$

**สมการโมเมนตัม**

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สมการพลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\Gamma$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงความร้อน ซึ่งกำหนดโดย  $\Gamma = \mu / Pr$

กลุ่มสมการควบคุมการไหลข้างต้นเมื่อใช้ร่วมกับเงื่อนไขขอบที่เหมาะสม สามารถนำไปวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบได้ แต่ถ้านำสมการควบคุมดังกล่าวมาวิเคราะห์ปัญหาที่มีการไหลแบบปั่นป่วน จะก่อให้เกิดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของการไหลแบบปั่นป่วนนั้นมีความซับซ้อน ดังนั้นในส่วนถัดไปจะนำเสนอพื้นฐานการไหลแบบปั่นป่วน เพื่อนำไปสู่สมการของแบบจำลองความปั่นป่วนรูปแบบต่างๆ และเป็นพื้นฐานในการตัดสินใจเลือกแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้คำนวณเชิงตัวเลขต่อไป

### 3.2 การไหลแบบปั่นป่วนและอิทธิพลของความปั่นป่วนในสมการนาเวียร์-สโตกส์

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนั้นค่าเลขเรย์โนลด์ของการไหลจะเป็นตัวชี้วัด จากการทดลองพบว่าที่เลขเรย์โนลด์ต่ำกว่าค่าวิกฤติ การไหลแต่ละชั้นของของไหลจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ ที่ค่าเลขเรย์โนลด์เกินค่าวิกฤติจะเกิดปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนขึ้นหลายอย่าง ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะจำเพาะของการไหลไปอย่างมาก เป็นการไหลไร้ระเบียบและยุ่งเหยิง การเคลื่อนที่ของของไหลเป็นแบบไม่คงตัวตลอดเวลาถึงแม้ว่าจะมีเงื่อนไขขอบเขตคงที่ก็ตาม ค่าและทิศทางของความเร็ว รวมทั้งคุณสมบัติอื่นๆ ของการไหลจะเปลี่ยนแปลงอย่างยุ่งเหยิง ซึ่งกลายเป็นการไหลแบบปั่นป่วนนั่นเอง ความยุ่งเหยิงดังกล่าวนี้เป็นผลให้ไม่สามารถคำนวณหาหรืออธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลได้

นอกจากนี้การไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะเกิดการหมุนวนขนาดเล็กโดยมีขนาดที่แตกต่างกัน เช่นสำหรับการไหลขนาด  $0.1\text{m}^2$  ที่มีค่าเลขเรย์โนลด์สูงๆ จะมีการหมุนวนตั้งแต่ขนาด  $10$  จนถึง  $100 \mu\text{m}$  ซึ่งหากต้องการจำลองการไหลโดยวิธีเชิงตัวเลขที่ละเอียดเพียงพอนั้น จะต้องสร้างปริมาตรควบคุมจำนวนมาก (ในช่วง  $10^9$  ถึง  $10^{12}$ ) และความถี่ของความแปรเปลี่ยนสูงสุดจะอยู่ในย่าน  $10 \text{ kHz}$  ซึ่งต้องใช้คาบเวลาการคำนวณในช่วง  $100 \mu\text{s}$  การจำลองปรากฏการณ์ของความปั่นป่วนแบบที่ขึ้นกับเวลาโดยตรงนั้นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูงมาก

หากทำการวัดค่าของความเร็วที่จุดใดจุดหนึ่งตลอดเวลาที่ยาวนานพอสมควร ในสนามการไหลปั่นป่วน ค่าของความเร็วสามารถเขียนได้เป็น

$$u_i = U_i + u'_i \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $U_i$  คือค่าความเร็วเฉลี่ย และค่า  $u'_i$  คือความเร็วที่ผันแปรหรือแกว่งไปมา ( $i=1,2,3$ ) ในทำนองเดียวกันสำหรับความดันและปริมาณสเกลาร์อื่นๆ สามารถเขียนได้เป็น

$$\varphi = \Phi + \varphi' \quad (3.5)$$

โดยที่  $\varphi$  แสดงถึงปริมาณสเกลาร์ เช่น ความดัน และพลังงาน  
ค่า  $\Phi$  คือค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติ  $\varphi$  ใดๆ ของของไหลและมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\Phi = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (3.6)$$

$\Delta t$  คือช่วงเวลาที่กว้างมากเพียงพอที่ครอบคลุมค่าความแปรเปลี่ยนที่ช้าที่สุดของคุณสมบัติการไหลนั้น(อันเนื่องมาจากการหมุนวนที่ใหญ่ที่สุด)

ค่าคุณสมบัติ  $\varphi$  ของการไหลที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลานั้น สามารถแสดงเป็นผลบวกของค่าเฉลี่ย  $\Phi$  กับค่าของความผันแปรที่ขึ้นกับเวลา ( $\varphi'$ ) ซึ่งค่าเฉลี่ยของความผันแปรนี้จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\overline{\varphi'} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi'(t) dt = 0 \quad (3.7)$$

แทนค่าสมการที่ (3.4) และ (3.5) ลงในสมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตกส์ หลังจากนั้นทำการเฉลี่ยตลอดทั้งสมการ โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการที่ (3.6) และ (3.7) จะได้สมการควบคุมสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i) = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (3.9)$$

เรียกกลุ่มสมการที่ (3.8) และ (3.9) นี้ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์เรย์โนลด์เฉลี่ย (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) หรือเรียกสมการที่ (3.9) ว่าสมการเรย์โนลด์ สังเกตได้ว่าสมการเรย์โนลด์นี้มีลักษณะเช่นเดียวกับสมการนาเวียร์-สโตกส์ แต่ผลของการเฉลี่ยนั้นทำให้เกิดพจน์ใหม่คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u'_i u'_j})$  ซึ่งมีความหมายถึงการเคลื่อนย้ายหรือถ่ายโอนโมเมนตัม อันเนื่องมาจากความเร็วผันแปรนั้น โดยทั่วไปจะจัดเทอมนี้ไว้ด้านขวาของสมการเพื่อแสดงให้เห็นว่าเป็นความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน ซึ่งเทอม  $-\overline{\rho u'_i u'_j}$  คือความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนและเรียกว่าความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stress) การไหลปั่นป่วนโดยทั่วไปนั้นค่าความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนนี้จะมีค่าสูงกว่าความเค้นเนื่องจากความหนืดของของไหลอย่างมาก

สำหรับสมการ RANS นั้นพบว่าไม่สามารถแก้สมการหาคำตอบได้ ในทางวิศวกรรมนั้น โดยทั่วไปจะให้ความสนใจกับค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติต่างๆ ของการไหลและของไหล และด้วยความซับซ้อนของความปั่นป่วนนั้น จะไม่พบสมการอย่างง่ายที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว ดังนั้นสมการของแบบจำลองความปั่นป่วน จึงมีบทบาทสำคัญซึ่งเกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิธีในการคำนวณ เพื่อให้มีความถูกต้องในระดับที่เพียงพอและครอบคลุมปัญหาความปั่นป่วนโดยทั่วไปได้

แบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่จะนำมาใช้วิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับงานวิจัยนี้ ถูกพัฒนาขึ้นจากสมมติฐานว่า อิทธิพลของความเค้นเรย์โนลด์ที่มีต่อการถ่ายเทโมเมนตัมในการไหลเฉื่อยนั้น คล้ายกับความเค้นอันเนื่องมาจากความหนืด ซึ่งเป็นสัดส่วนกับอัตราการเสียรูปของชั้นส่วนของของไหลสำหรับของไหลแบบนิวโทเนียนและอัดไม่ได้ จะได้ว่า

$$\tau_{ij} = \mu s_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.10)$$

อัตราการเสียรูปของชั้นส่วนของของไหลประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยและค่าผันแปรของการเสียรูป แสดงได้ดังสมการ  $s_{ij}(t) = S_{ij} + s'_{ij}$  จากการทดลองพบว่าความปั่นป่วนมีการสลายตัวไปหากไม่มีแรงเฉือน และพบว่าค่าของความเค้นเรย์โนลด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเฉือนของการไหลเพิ่มขึ้น ดังนั้น Boussinesq จึงได้เสนอสมมติฐานไว้ในปี 1877 ว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.11)$$

โดยที่  $\mu_t$  คือค่าความหนืดที่เกิดจากความปั่นป่วน (turbulent viscosity) และค่า  $k$  คือพลังงานจลน์ต่อหน่วยมวลซึ่งมีสมการเป็น  $k = 0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$  และค่า  $\delta_{ij}$  เรียกว่าโครเนคเกอร์เดลต้า (Kronecker delta,  $\delta_{ij} = 1$  เมื่อ  $i = j$  และ  $\delta_{ij} = 0$  เมื่อ  $i \neq j$ ) จากสมมติฐานของ Boussinesq นี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  และแบบ  $k-\omega$

ซึ่งเป็นพื้นฐานของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และมีข้อดีคือใช้ทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ไม่สูงนักสำหรับการคำนวณหาค่า  $\mu$ ,

ค่า  $\mu$ , นั้นเป็นฟังก์ชันของค่า  $k$  และ  $\epsilon$  โดยที่แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  นี้มีการสร้างสมการการเคลื่อนย้ายเพิ่มขึ้นมาอีก 2 สมการ คือสมการของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน( $k$ ) และสมการของอัตราการสลายตัวของพลังงานความปั่นป่วนนั้น( $\epsilon$ ) โดยพิจารณาว่าสนามการไหลได้ก่อให้เกิดการเคลื่อนย้ายของการหมุนวนผ่านกระบวนการการพา การแพร่ อีกทั้งมีการสร้างใหม่ อันเนื่องมาจากการเฉือนของกระแสการไหลหลักและการสลายตัว โดยแบบจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าค่าของความหนืดปั่นป่วนนั้นเป็นแบบไอโซโทรปิก(isotropic) หรือกล่าวได้ว่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นเรย์โนลด์ กับอัตราการเสียรูปของก้อนของไหลมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะมองในทิศทางใด ซึ่งสมมุติฐานนี้อาจไม่ถูกต้องนักสำหรับการไหลหลายรูปแบบ จึงเป็นผลให้การจำลองมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจโดยรวมของแบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงลักษณะทั่วไปของการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนัง

### 3.3 การไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต

การไหลแบบปั่นป่วนนั้นได้รับอิทธิพลโดยตรงจากการมีอยู่ของผนัง สนามของความเร็วเฉลี่ย ได้รับอิทธิพลจากเงื่อนไขการไม่เลื่อนไหลซึ่งเกิดขึ้นที่ผนัง อย่างไรก็ตามความปั่นป่วนจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการมีอยู่ของผนังในรูปแบบที่ไม่ธรรมดา ซึ่งในบริเวณที่ใกล้กับผนังมากๆ นั้น การหน่วงจากความหนืดของของไหลจะลดความเร็วผันแปรในแนวสัมผัส ในขณะที่การหยุดชะงักของพลังงานจลน์จะลดความเร็วผันแปรในแนวตั้งฉาก และเมื่อห่างจากผนังมากขึ้นระดับความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีการสร้างพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนจากค่าเกรเดียนต์ขนาดใหญ่ของความเร็วจลเฉลี่ย แบบจำลองการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนังนั้น จะส่งผลอย่างสำคัญต่อผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณ นอกจากนี้ในบริเวณที่ใกล้กับผนังนั้นเกรเดียนต์ของค่าตัวแปรต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงสูงมาก

สำหรับการไหลปั่นป่วนที่มีผนังเป็นของแข็งเข้ามาเกี่ยวข้อง ระบบตัวแปรไร้มิติได้ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาความเชื่อมโยงกับผลที่ได้จากการทดลอง สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในช่องทางไหล ค่าเลขเรย์โนลด์จะคำนวณจากความยาวอ้างอิงของช่องทางไหล ( $Re_D$ ) ซึ่งมีค่าสูงมากและบอกเป็นนัยว่าเทอมของแรงเฉื่อยมีมากกว่าแรงเนื่องจากความหนืดอย่างยิ่ง

เพื่อความสะดวกสำหรับการวิเคราะห์การไหลที่ใกล้กับผนัง โดยทั่วไปการคำนวณค่าเลขเรย์โนลด์จะใช้ค่าระยะทาง  $y$  ซึ่งเป็นระยะห่างจากผนัง นำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงของความยาวบ่งลักษณะ ( $Re_y = Uy/\nu$ ) จะเห็นได้ว่าหากระยะทาง  $y$  นั้นมีขนาดอยู่ในย่านเดียวกับ  $Re_D$  การวิเคราะห์จะให้ผลได้ในลักษณะเดียวกับการใช้ค่าความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหล ซึ่งมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายถึงแรงเฉื่อยจะมีอิทธิพลต่อการไหลที่บริเวณที่ไกลผนังออกไป และหากระยะทาง  $y$  ลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งหมายถึงตำแหน่งใกล้ผนังค่าเลขเรย์โนลด์ก็จะลดลง ซึ่งจะมีที่ระยะ  $y$  ค่าหนึ่งมีค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1 นั้นหมายถึงอิทธิพลของแรงเฉื่อยจะมีเท่ากับแรงเฉื่อยและจะมีมากขึ้นเมื่อระยะใกล้กว่านี้

ที่บริเวณใกล้ผนังเช่นนี้จะไม่ได้รับอิทธิพลของกระแสการไหลที่ไกลออกไป ที่บริเวณนี้ ค่าเฉลี่ยของความเร็ว  $U$  จะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากผนัง  $y$ , ค่าของความหนาแน่น  $\rho$ , ความหนืด  $\mu$  และค่าของความเค้นเฉือนที่ผนัง  $\tau_w$  จากการวิเคราะห์มิติจะได้ว่า

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = f\left(\frac{\rho u_\tau y}{\mu}\right) = f(y^+) \quad (3.12)$$

สมการที่ (3.12) นี้เรียกว่ากฎของผนัง (the law of the wall) ซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มของตัวแปรไร้มิติที่สำคัญ 2 กลุ่ม คือ  $u^+$  และ  $y^+$  โดยสเกลของความเร็วที่นำมาเทียบกับความเร็วจริงคือ  $u_\tau$  ซึ่งกำหนดเท่ากับ  $(\tau_w/\rho)^{1/2}$  และเรียกว่าความเร็วเสียดทาน (friction velocity)

มีการทดลองจำนวนมากที่แสดงให้เห็นถึงการไหลในบริเวณใกล้กับผนัง ซึ่งสามารถแบ่งชั้นการไหลออกได้เป็น 3 ชั้นย่อยตามค่า  $y^+$  คือ ( $y^+ = \rho u_\tau y / \mu$ )

1. ชั้นด้านในสุดที่ติดกับผนังซึ่งเรียกว่าชั้นย่อยหนืด (viscous sublayer) มีค่า  $y^+ < 5$  โดยมีการไหลเกือบจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ และค่าความหนืดของของไหลจะมีบทบาทสำคัญต่อโมเมนตัมและการถ่ายเทความร้อน
2. ชั้นนอกสุดเรียกว่าชั้นการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ (fully turbulent region หรือ log-law region) มีค่า  $y^+ > 60$  ซึ่งความปั่นป่วนจะมีบทบาทสำคัญต่อการไหล
3. ชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นย่อยหนืดและชั้นการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่าชั้นบัฟเฟอร์ (buffer layer หรือ blending region) มีค่า  $5 < y^+ < 60$  ซึ่งการไหลในชั้นนี้จะได้รับอิทธิพลจากความหนืดของของไหลและความปั่นป่วนทั้งสองกรณี

แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษานั้น มีความเกี่ยวข้องและเชื่อมโยงกับค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนและการสูญเสียของค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน ซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

### 3.4 พลังงานจลน์ปั่นป่วนและการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน

สำหรับการนำเสนอแบบจำลองความปั่นป่วนนั้น ในเบื้องต้นจะทำความเข้าใจเกี่ยวกับความหมายของพลังงานจลน์ต่อหน่วยมวล ณ ระยะเวลาหนึ่ง ๆ โดยมีสัญลักษณ์  $k(t)$  ซึ่งคือผลบวกของพลังงานจลน์อันเนื่องมาจากกระแสการไหลเฉลี่ย  $K = 0.5(U^2 + V^2 + W^2)$  และพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน  $k$  นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k(t) = K + k \quad (3.13)$$

นอกจากนี้ค่าความเข้มข้นของความปั่นป่วน  $T_i$  นั้นเป็นค่าที่เชื่อมโยงกับค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนกับพลังงานจลน์ของการไหลเฉลี่ย แสดงดังสมการ

$$T_i = \frac{\left(\frac{2}{3}k\right)^{1/2}}{U_{ref}} \quad (3.14)$$

สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนถูกสร้างขึ้นจากขั้นตอนดังนี้

- (1) คุณสมบัติการเรย์โนลด์ต์ด้วยความเร็วเฉลี่ยที่เหมาะสม (เช่น ทำการคุณสมบัติการเรย์โนลด์ต์ในแนวแกน  $x$  ด้วยความเร็วเฉลี่ย  $U$  เป็นต้น) จากนั้นรวมผลคูณทั้งสามเข้าด้วยกัน
- (2) คุณสมบัติการนาเวียร์สโตกส์ด้วยความเร็วผันแปรที่เหมาะสม (เช่น ทำการคุณสมบัติการนาเวียร์สโตกส์ในแนวแกน  $x$  ด้วยความเร็วผันแปร  $u'$  เป็นต้น) จากนั้นรวมสมการทั้งหมดเข้าด้วยกัน

นำผลลัพธ์ที่ได้ในข้อ (2) ลบออกจากข้อ (1) เพื่อให้ได้ผลต่างซึ่งจะเป็นสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน แสดงได้ดังนี้

$$\text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div}\left(-\overline{p' \mathbf{u}'} + 2\overline{\mu \mathbf{u}' s'_{ij}} - \rho \frac{1}{2} \overline{u'_i \cdot u'_i u'_j}\right) - 2\overline{\mu s'_{ij} \cdot s'_{ij}} - \overline{\rho u'_i u'_j} \cdot S_{ij} \quad (3.15)$$

แต่ละเทอมสามารถอธิบายได้ดังนี้

การเคลื่อนย้าย  $k$  โดยการพา = การเคลื่อนย้าย  $k$  โดยความดัน + การเคลื่อนย้าย  $k$  โดยความเค้นหนืด + การเคลื่อนย้าย  $k$  โดยความเค้นเรย์โนลด์ต์ - อัตราการสูญเสียของ  $k$  เนื่องจากความหนืด + อัตราการสร้าง  $k$

โดยที่ค่า  $\mathbf{u}'$  คือเวกเตอร์ของความเร็วผันแปร พิจารณาสมการที่ (3.15) พบว่าเทอมของการสูญเสียของพลังงานเนื่องจากความหนืดซึ่งคือเทอม  $-2\overline{\mu s'_{ij} \cdot s'_{ij}}$  สามารถกระจายได้ดังนี้

$$-2\overline{\mu s'_{ij} \cdot s'_{ij}} = -2\mu \left( \overline{s_{11}^2} + \overline{s_{22}^2} + \overline{s_{33}^2} + 2\overline{s_{12}^2} + 2\overline{s_{13}^2} + 2\overline{s_{23}^2} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าดังกล่าวนี้ติดลบซึ่งชี้ให้เห็นว่า การสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วนนั้นเกิดจากงานของกระแสมุมวนที่เล็กที่สุด กระทำในรูปแบบของความเค้นอันเนื่องมาจากความหนืด อัตราการสูญเสียในของไหลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมีหน่วยในระบบ SI เป็น  $m^2/s^3$  ค่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ทางด้านความปั่นป่วน โดยมีนิยามดังนี้

$$\varepsilon = 2\nu \overline{s'_{ij} \cdot s'_{ij}} \quad (3.16)$$

เทอมนี้มีขนาดใหญ่พอๆ กับเทอมการสร้างความปั่นป่วน ในการไหลที่มีเลขเรย์โนลด์สูงนั้น เทอม  $2\mu \overline{u' s'_{ij}}$  ในสมการที่ (3.15) ที่เกิดจากความหนืดจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอม  $-2\mu s'_{ij} \cdot s'_{ij}$  ที่เกิดจากความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน RNG  $k-\varepsilon$  และ SST  $k-\omega$  ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อยู่ในกลุ่ม  $k-\varepsilon$  และ  $k-\omega$  ตามลำดับ ดังนั้นในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงแบบจำลองในกลุ่ม  $k-\varepsilon$  และกลุ่ม  $k-\omega$  เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจและเห็นภาพโดยรวมของแบบจำลองความปั่นป่วนเหล่านี้

### 3.5 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$

แบบจำลอง RNG  $k-\varepsilon$  ซึ่งได้ถูกปรับปรุงมาจากแบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงแบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.5.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ มาตรฐาน

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\varepsilon$  มาตรฐานเป็นแบบจำลองที่สมบูรณ์และมีรูปแบบที่ง่ายที่สุดของแบบจำลองความปั่นป่วนที่มี 2 สมการ แบบจำลองนี้ได้พัฒนาขึ้นร่วมกับผลการทดลองโดยมีสมมุติฐานว่า เป็นการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์(การไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง) และไม่พิจารณาอิทธิพลของความหนืดเชิงโมเลกุล ดังนั้นจึงมีความถูกต้องเพียงสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์เท่านั้น โดยทั่วไปสามารถสร้างสมการการเคลื่อนย้ายของคุณสมบัติทางด้านความปั่นป่วนได้แม้กระทั่งอัตราการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน( $\varepsilon$ ) แต่สมการการเคลื่อนย้ายของ  $\varepsilon$  นี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรไม่ทราบค่าจำนวนมากและไม่สามารถวัดค่าได้ แบบจำลอง  $k-\varepsilon$  แบบมาตรฐานจะมีสมการการเคลื่อนย้ายของพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ  $k$  และ  $\varepsilon$  ซึ่งพัฒนามาจากพื้นฐานความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้

สมการการเคลื่อนย้ายสำหรับ  $k$  และ  $\varepsilon$  ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.18)$$

สมการที่ (3.17) และ (3.18) สามารถเขียนได้ในรูปทั่วไปคือ

การเคลื่อนย้ายของ  $k$  (หรือ  $\varepsilon$ ) โดยการพา = การเคลื่อนย้ายของ  $k$  (หรือ  $\varepsilon$ ) โดยการแพร่ + อัตราการ  
สร้าง  $k$  (หรือ  $\varepsilon$ ) + อัตราการทำลาย  $k$  (หรือ  $\varepsilon$ )

โดยที่  $G_k$  คือเทอมที่แสดงถึงการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วน ซึ่งเทอมนี้มีนิยามโดย

$$G_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (3.19)$$

การหาค่า  $G_k$  ในรูปแบบที่สอดคล้องกับสมมติฐานของ Boussinesq คือ

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (3.20)$$

เมื่อค่า  $S$  คือค่าเทนเซอร์ของอัตราการเสียรูปเฉลี่ย และมีนิยามเป็น

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.21)$$

โดยที่

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.22)$$

ค่า  $\sigma_k$  และ  $\sigma_\varepsilon$  คือเลขพรานด์ของความปั่นป่วน (turbulent Prandtl numbers) สำหรับค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  ตามลำดับ ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่สำหรับแบบจำลอง  $k$ - $\varepsilon$  แบบมาตรฐาน

ค่า  $\mu_t$  มีสมการดังนี้

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $C_\mu$  เป็นค่าตัวแปรไร้มิติซึ่งเป็นค่าคงที่ และในสมการ (3.17) และ (3.18) มีค่าคงที่ดังนี้

$$C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.00; \sigma_\varepsilon = 1.30; C_{1\varepsilon} = 1.44 \text{ และ } C_{2\varepsilon} = 1.92$$

ถึงแม้ว่าแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน จะได้รับความนิยมอย่างมากในการนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมแต่ก็มีข้อจำกัดของการใช้งานอยู่พอสมควร แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน ให้ผลการจำลองที่ไม่ดีในลักษณะการไหลดังต่อไปนี้

1. การไหลที่ไม่มีขอบเขตแน่นอนบางแบบ
2. การไหลที่มีความเครียดสูงมากๆ (ชั้นขีตผิวที่มีความโค้งมากๆ และการไหลเป็นเกลียว)
3. การไหลแบบหมุนวน
4. การไหลที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ในท่อที่มีหน้าตัดไม่เป็นวงกลม

จะเห็นว่าแบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\varepsilon$  นั้นมีข้อเสียซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมกับการไหลเป็นเกลียวและการไหลที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ในท่อที่มีหน้าตัดไม่เป็นวงกลม ซึ่งเป็นลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้

และเนื่องจากในปัจจุบันมีการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการไหลปั่นป่วนขึ้นมาหลายแบบจำลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถใช้งานได้กับการไหลหลายลักษณะ ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นฐานของการไหลที่ได้พัฒนาแบบจำลองขึ้น และเมื่อย้อนกลับไปพิจารณาเนื้อหาในบทที่ 2 ที่ได้กล่าวถึงวรรณกรรมปริทรรศน์ ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนของกรณีการไหลผ่านครีบริบบแบบต่างๆ โดยพบว่ามี 2 แบบจำลองที่อยู่ในความสนใจของนักวิจัย เนื่องจากมีความเหมาะสมและเป็นที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือแบบจำลอง RNG  $k-\varepsilon$  และ SST  $k-\omega$  โดยที่ทั้งสองแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ได้มีการปรับปรุงขึ้นจากแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน ดังนั้นในส่วนถัดไปจะได้นำเสนอรายละเอียดของแบบจำลองดังกล่าวนี้

### 3.5.2 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$

แบบจำลอง RNG  $k-\varepsilon$  เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากการใช้วิธีเชิงสถิติอย่างแม่นยำ (ซึ่งเรียกว่าทฤษฎี Renormalization group, RNG) ซึ่งคล้ายกับแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน แต่ได้เพิ่มเทอมต่างๆ เข้าไป ดังต่อไปนี้

- (1) ทฤษฎี RNG ให้สมการสำหรับการวิเคราะห์เลขพราวน์ของความปั่นป่วน ในขณะที่แบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐานจะใช้วิธีระบุเป็นค่าคงที่
- (2) แบบจำลอง RNG นั้นได้รวมอิทธิพลของการหมุนวน (rotation หรือ swirl) ต่อการไหลปั่นป่วน และเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลหมุนวน
- (3) แบบจำลอง RNG ได้เพิ่มพจน์เข้าไปในสมการ  $\varepsilon$  ซึ่งมีส่วนสำคัญในการปรับปรุงความแม่นยำสำหรับการไหลที่เกิดความเครียดอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) ในขณะที่แบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐานเป็นแบบจำลองสำหรับเลขเรย์โนลด์สูง แต่ทฤษฎี RNG ให้สมการการวิเคราะห์ในรูปสมการอนุพันธ์สำหรับค่าความหนืดยังผล ( $\mu_{eff}$ ) ที่ใช้ในการคำนวณสำหรับบัพธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่ำ ซึ่งผลของการคำนวณในลักษณะนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการจำลองการไหลที่ใกล้กับผนัง

จากลักษณะดังกล่าวข้างต้นทำให้แบบจำลอง RNG  $k-\varepsilon$  มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือได้สำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์การไหลที่หลากหลายมากกว่าแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน

สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง RNG  $k-\varepsilon$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (3.25)$$

ค่าความหนืดยังผล ( $\mu_{eff}$ ) โดยทั่วไปมีสมการเป็น

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.26)$$

ค่า  $\alpha_k$  และ  $\alpha_\varepsilon$  คือเลขพรานด์ต์ยังผลผกผัน (inverse effective Prandtl numbers) สำหรับค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  ตามลำดับ ซึ่งถูกคำนวณจากสมการที่ได้พัฒนาขึ้นมาจากทฤษฎี RNG ดังนี้

$$\frac{\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679}}{\mu_{eff}} = \frac{\mu}{\mu_{eff}} \quad (3.27)$$

เมื่อค่า  $\alpha_0 = 1.0$  สำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง ( $\mu/\mu_{eff} \ll 1$ ) ผลจากการคำนวณพบว่า  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon \approx 1.393$

ความแตกต่างที่สำคัญของแบบจำลอง RNG กับแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน ก็คือการเพิ่มค่า  $R_\varepsilon$  เข้าไปในสมการ  $\varepsilon$  ซึ่งกำหนดโดย

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\eta = Sk/\varepsilon$  ,  $\eta_0 = 4.38$  และ  $\beta = 0.012$

อิทธิพลของ  $R_\varepsilon$  ของสมการ  $\varepsilon$  ในแบบจำลอง RNG สามารถเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อจัดรูปสมการที่ (3.25) ใหม่ โดยการแทนค่าจากสมการที่ (3.28) ลงในสมการที่ (3.25) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.29)$$

$$\text{เมื่อ} \quad C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (3.30)$$

ในบริเวณที่อยู่ในชั้นของการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ( $\eta < \eta_0$ ) ค่า  $C_{2\varepsilon}^* > C_{2\varepsilon}$  เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน จากผลที่ได้ทำให้มีการทำลายค่า  $\varepsilon$  เพิ่มขึ้น ค่า  $\varepsilon$  จึงลดลง และส่งผลให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้น ดังนั้นสำหรับการไหลที่มีความเครียดเฉือนน้อยถึงปานกลาง แบบจำลอง RNG จะให้ค่าความหนืดปั่นป่วนที่มีแนวโน้มมากกว่าแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน

สำหรับในบริเวณที่มีอัตราความเครียดสูง ( $\eta > \eta_0$ ) จะส่งผลให้ค่า  $C_{2\varepsilon}^* < C_{2\varepsilon}$  เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน การทำลายที่น้อยลงของค่า  $\varepsilon$  จะทำให้ค่า  $\varepsilon$  เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่า  $k$  ลดลง ซึ่งทำให้การไหลจะได้รับอิทธิพลจากความหนืดของของไหล ดังนั้นการไหลที่มีความเครียดเฉือนอย่างรวดเร็ว แบบจำลอง RNG จะให้ค่าความหนืดปั่นป่วนต่ำกว่าค่าในแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน ดังนั้น แบบจำลอง RNG จะตอบสนองต่ออิทธิพลของความเครียดเฉือนและความโค้งของเส้นกระแสมากกว่าแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน

ทฤษฎี RNG ให้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับการวิเคราะห์ความหนืดอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน (turbulent viscosity) ดังนี้

$$d \left( \frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}} d\hat{\nu} \quad (3.31)$$

เมื่อ  $\hat{\nu} = \mu_{eff} / \mu$  และ  $C_\nu \approx 100$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (3.31) จะได้ค่าที่แม่นยำของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนย้าย ที่เกิดจากอิทธิพลของความปั่นป่วนกับอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ (หรือในระบับการหมุนวนขนาดเล็ก) ซึ่งแบบจำลองนี้จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีสำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำในบริเวณใกล้กับผนัง

ในกรณีการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง สมการที่ (3.31) จะเปลี่ยนไปเป็น

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.32)$$

โดยที่ค่า  $C_\mu = 0.0875$  ซึ่งค่านี้ได้มาจากทฤษฎี RNG และมีข้อสังเกตที่น่าสนใจว่าค่า  $C_\mu$  นี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทดลองที่มีค่า  $C_\mu = 0.09$  ในสมการแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน โดยทั่วไปแล้วอิทธิพลเนื่องจากความหนืดปั่นป่วนนั้นจะถูกคำนวณโดยใช้การคำนวณในกรณีเลขเรย์โนลด์สูงในสมการที่ (3.32) อย่างไรก็ตามเมื่อต้องการรวมอิทธิพลของการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ แบบจำลอง RNG จะมีทางเลือกที่สามารถใช้ได้โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ดังได้แสดงในสมการที่ (3.31)

ค่าคงที่ในสมการของแบบจำลอง RNG แสดงได้ดังนี้

$$C_{1\varepsilon} = 1.42; \quad C_{2\varepsilon} = 1.68$$

### 3.6 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$

แบบจำลองความปั่นป่วนในกลุ่มของ  $k-\omega$  ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือแบบจำลอง SST  $k-\omega$  ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ปรับปรุงมาจากแบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐาน ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงแบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\omega$  มาตรฐาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.6.1 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\omega$ มาตรฐาน

แบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐานตั้งอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลอง Wilcox  $k-\omega$  ซึ่งถูกปรับปรุงให้สอดคล้องกับอิทธิพลของการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ การไหลอัดได้ และการกระจายการไหลเฉือน แบบจำลอง Wilcox สามารถทำนายการไหลเฉือนอิสระ ชั้นการไหลผสม การไหลผ่านระนาบ การไหลรอบวัตถุ และลำการไหลในแนวรัศมี และยังสามารถประยุกต์ให้ใช้ได้กับการไหลที่มีผนังเป็นขอบเขต แบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐาน คือแบบจำลองเชิงทดลองที่มีพื้นฐานมาจากสมการการเคลื่อนย้ายของค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $k$ ) และอัตราการสูญเสียเฉพาะ (specific dissipation rate),  $\omega$  ซึ่งพิจารณาได้ในรูปของ  $\omega = \varepsilon/k$  นอกจากนี้แบบจำลอง  $k-\omega$  ได้เพิ่มเทอมของการสร้างทั้งในสมการของ  $k$  และ  $\omega$  เพื่อปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองสำหรับการทำนายการไหลเฉือนอิสระ

ค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน,  $k$  และอัตราการสูญเสียเฉพาะ,  $\omega$  คำนวณได้จากสมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐาน แสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (3.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega \quad (3.34)$$

ความหมายของแต่ละพจน์แสดงได้ดังนี้

(1) ค่า  $G_k$  คือเทอมที่แสดงถึงการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วน ซึ่งเทอมนี้ใช้นิยามเดียวกันกับแบบจำลอง  $k-\epsilon$

(2) ค่าการแพร่กระจายยังผล(effective diffusivities) มีสมการดังนี้

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (3.35)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (3.36)$$

เมื่อค่า  $\sigma_k$  และ  $\sigma_\omega$  คือเลขพรานด์ของความปั่นป่วน (turbulent Prandtl numbers) สำหรับค่า  $k$  และ  $\omega$  ตามลำดับซึ่งถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ และค่าความหนืดปั่นป่วน,  $\mu_t$  ถูกคำนวณโดยการรวมค่า  $k$  และ  $\omega$  โดยมีสมการดังนี้

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (3.37)$$

สำหรับการแก้ปัญหาการไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำนั้น ค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha^*$  จะไปหวนค่าความหนืดปั่นป่วนซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความแม่นยำสำหรับการไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำ ค่า  $\alpha^*$  มีสมการดังนี้

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left( \frac{\alpha_0^* + Re_t / R_k}{1 + Re_t / R_k} \right) \quad (3.38)$$

เมื่อ

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (3.39)$$

$$R_k = 6 \quad (3.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (3.41)$$

$$\beta_i = 0.072 \quad (3.42)$$

สำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูงนั้น แบบจำลอง  $k-\omega$  จะใช้ค่า  $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1.0$

(3) ค่า  $G_\omega$  คือเทอมของการสร้างค่า  $\omega$  ซึ่งแสดงโดย

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (3.43)$$

ในสมการที่ (3.43) นั้นค่า  $\alpha$  กำหนดให้โดย

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left( \frac{\alpha_0^* + Re_t / R_\omega}{1 + Re_t / R_\omega} \right) \quad (3.44)$$

เมื่อค่า  $R_\omega = 2.95$  และนอกจากนี้ค่า  $\alpha^*$  และค่า  $Re_t$  หาค่าได้จากสมการ (3.38) และ (3.39) ตามลำดับ และสำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูงนั้น แบบจำลอง  $k-\omega$  จะใช้ค่า  $\alpha = \alpha_\infty = 1.0$

(4) ค่าการสูญเสียของ  $k$  กำหนดโดย

$$Y_k = \rho \beta^* f_\beta k \omega \quad (3.45)$$

เมื่อ

$$f_\beta = \begin{cases} 1 & \chi_k \leq 0 \\ \frac{1 + 680 \chi_k^2}{1 + 400 \chi_k^2} & \chi_k > 0 \end{cases} \quad (3.46)$$

เมื่อ

$$\chi_k \equiv \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.47)$$

และ

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \zeta^* F(M_t)] \quad (3.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left( \frac{4/5 + (Re_t / R_\beta)^4}{1 + (Re_t / R_\beta)^4} \right) \quad (3.49)$$

$$\zeta^* = 1.5 \quad (3.50)$$

$$R_\beta = 8 \quad (3.51)$$

$$\beta_\infty^* = 0.09 \quad (3.52)$$

โดยที่ค่า  $Re_t$  กำหนดโดยสมการที่ (3.39)

(5) ค่าการสูญเสียของ  $\omega$  กำหนดโดย

$$Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2 \quad (3.53)$$

เมื่อ

$$f_\beta = \frac{1 + 70\chi_\omega}{1 + 80\chi_\omega} \quad (3.54)$$

$$\chi_\omega = \left| \frac{\Omega_{ij} \Omega_{jk} S_{ki}}{(\beta_\infty^* \omega)^3} \right| \quad (3.55)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.56)$$

เทนเซอร์ของอัตราความเครียด  $S_{ij}$  กำหนดโดยสมการที่ (3.22) และ

$$\beta = \beta_i \left[ 1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} \zeta^* F(M_t) \right] \quad (3.57)$$

$\beta_i^*$  ได้แสดงไว้ในสมการ (3.49) และค่า  $F(M_t)$  คือฟังก์ชันของการอัดได้ มีสมการเป็น

$$F(M_t) = \begin{cases} 0 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t > M_{t0} \end{cases} \quad (3.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_i^2 = 2 \frac{k}{a^2} \quad (3.59)$$

$$M_{i,0} = 0.25 \quad (3.60)$$

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (3.61)$$

สำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูงนั้น แบบจำลอง  $k-\omega$  จะใช้ค่า  $\beta_i^* = \beta_\infty^*$  และสำหรับการไหลอัดไม่ได้นั้นค่า  $\beta^* = \beta_i^*$

(6) ค่าคงที่ต่างๆ ในแบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐาน มีดังนี้

$$\alpha_\infty^* = 1, \quad \alpha_\infty = 0.52, \quad \alpha_0 = 1/9, \quad \beta_\infty^* = 0.09, \quad \beta_i = 0.072, \quad R_\beta = 8$$

$$R_k = 6, \quad R_\omega = 2.95, \quad \zeta^* = 1.5, \quad M_{i,0} = 0.25, \quad \sigma_k = 2, \quad \sigma_\omega = 2$$

### 3.6.2 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$

แบบจำลองการเคลื่อนย้ายของความเค้นเฉือน (shear-stress transport, SST)  $k-\omega$  หรือเรียกว่า SST  $k-\omega$  เป็นแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นจากสมการที่มีการผสมผสานกันอย่างดีและแม่นยำระหว่างแบบจำลอง  $k-\omega$  ในบริเวณการไหลใกล้ผนังกับการไหลที่เป็นอิสระจากกระแสการไหลหลักของแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  ในสนามการไหลที่ไกลออกไปจากผนัง โดยทั่วไปจะมีความคล้ายคลึงกับ  $k-\omega$  มาตรฐาน แต่ได้เพิ่มสิ่งต่างๆ เข้าไปดังต่อไปนี้

(1) แบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐานและแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  ถูกรวมเข้าด้วยกันด้วยฟังก์ชันการผสมผสาน (blending function) ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อกระตุ้นการใช้แบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐานในบริเวณการไหลใกล้ผนัง และจะกระตุ้นการใช้แบบจำลอง  $k-\varepsilon$  สำหรับบริเวณการไหลที่ไกลจากผนัง

(2) แบบจำลอง SST ได้รวมเทอมการแพร่กระจายข้าม (cross-diffusion) ไว้ในสมการ  $\omega$

(3) มีการปรับปรุงนิยามของค่าของความหนืดปั่นป่วน โดยรวมผลการเคลื่อนย้ายของความเค้นเฉือนปั่นป่วนเข้าไว้ด้วย

ลักษณะต่างๆ ที่ได้สร้างขึ้นในแบบจำลอง SST  $k-\omega$  ทำให้มีความแม่นยำมากขึ้นและเชื่อถือได้กับการไหลในช่วงกว้างมากกว่าแบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐาน เช่น การไหลที่มีค่าความดันต่ำกลับ การไหลผ่านแพนอากาศ การไหลที่มีคลื่นช็อค การปรับปรุงดังกล่าวนี้ทำให้มั่นใจได้ว่าสมการของแบบจำลองมีพฤติกรรมที่เหมาะสมกับบริเวณการไหลทั้งไกลและใกล้ผนัง

### 3.6.2.1 สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง SST $k-\omega$

สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง SST  $k-\omega$  แสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k \quad (3.62)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (3.63)$$

ความหมายของแต่ละพจน์ในสมการที่ (3.62) และ (3.63) สามารถแสดงได้ดังนี้

(1) ค่าการแพร่กระจายยังผล (effective diffusivities) สำหรับแบบจำลอง SST  $k-\omega$  มีสมการดังนี้

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (3.64)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (3.65)$$

เมื่อค่า  $\sigma_k$  และ  $\sigma_\omega$  คือเลขพรานด์ของความปั่นป่วน (turbulent Prandtl numbers) สำหรับค่า  $k$  และ  $\omega$  ตามลำดับ และค่าความหนืดปั่นป่วน,  $\mu_t$  ถูกคำนวณจากสมการดังนี้

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega} \right]} \quad (3.66)$$

เมื่อค่า  $S$  คือขนาดของอัตราของความเครียด (strain rate magnitude) และ

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1 / \sigma_{k,1} + (1 - F_1) / \sigma_{k,2}} \quad (3.67)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1 / \sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) / \sigma_{\omega,2}} \quad (3.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha^*$  กำหนดโดยสมการที่ (3.41) และฟังก์ชันของการผสมผสาน  $F_1$  และ  $F_2$  กำหนดโดย

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (3.69)$$

$$\Phi_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega}^+ y^2} \right] \quad (3.70)$$

$$D_{\omega}^+ = \max \left[ 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (3.71)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (3.72)$$

$$\Phi_2 = \max \left[ 2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (3.73)$$

เมื่อค่า  $y$  คือค่าระยะทางที่ห่างจากพื้นผิว และค่า  $D_{\omega}^+$  คือค่าส่วนที่เป็นบวกของเทอมการแพร่กระจายข้าม,  $D_{\omega}$  ซึ่งการเปลี่ยนรูปสมการจากแบบจำลอง  $k-\epsilon$  มาเป็นแบบจำลอง  $k-\omega$  นั้นได้นำไปสู่การเพิ่มเทอม  $D_{\omega}$  ซึ่งมีสมการเป็น

$$D_{\omega} = 2(1 - F_1)\rho\sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.74)$$

(2) ค่า  $\tilde{G}_k$  คือเทอมที่แสดงถึงการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย เทอมนี้มีนิยามโดย

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10\rho\beta^* k\omega) \quad (3.75)$$

เมื่อค่า  $G_k$  ถูกกำหนดให้มีความหมายเดียวกันกับแบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐาน

(3) ค่า  $G_{\omega}$  คือเทอมของการสร้างค่า  $\omega$  ซึ่งแสดงโดย

$$G_{\omega} = \frac{\alpha}{\nu_t} G_k \quad (3.76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตได้ว่าสมการนี้แตกต่างจากค่าในแบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐาน ซึ่งความแตกต่างในสองแบบจำลองจะเห็นได้ชัดว่าแตกต่างกันที่ค่า  $\alpha_\infty$  โดยในแบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐานค่า  $\alpha_\infty$  เป็นค่าคงที่และถูกกำหนดให้เท่ากับ 0.52 แต่สำหรับแบบจำลอง SST  $k-\omega$  นั้นค่า  $\alpha_\infty$  มีสมการเป็น

$$\alpha_\infty = F_1\alpha_{\infty,1} + (1-F_1)\alpha_{\infty,2} \quad (3.77)$$

เมื่อ

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1}\sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (3.78)$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2}\sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (3.79)$$

เมื่อ  $\kappa$  มีค่าเท่ากับ 0.41

(4) ค่าการสูญเสียของ  $k$  กำหนดโดย  $Y_k$  ซึ่งมีนิยามคล้ายกับแบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐาน แต่สำหรับแบบจำลอง SST  $k-\omega$  จะกำหนดให้ค่า  $f_{\beta^*} = 1$  ดังนั้นจะได้

$$Y_k = \rho\beta^*k\omega \quad (3.80)$$

(5) ค่าการสูญเสียของ  $\omega$  กำหนดโดย  $Y_\omega$  ซึ่งมีนิยามคล้ายกับแบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐาน แต่สำหรับแบบจำลอง SST  $k-\omega$  จะกำหนดให้ค่า  $f_\beta = 1$  ดังนั้นจะได้

$$Y_\omega = \rho\beta\omega^2 \quad (3.81)$$

สำหรับการแทนค่าคงที่นั้น ค่า  $\beta_i$  กำหนดโดย

$$\beta_i = F_1\beta_{i,1} + (1-F_1)\beta_{i,2} \quad (3.82)$$

ซึ่งค่า  $F_1$  กำหนดโดยสมการที่ (3.69)

(6) ค่าคงที่ต่างๆ ในแบบจำลอง SST  $k-\omega$  มีดังนี้

$$\sigma_{k,1} = 1.176, \quad \sigma_{\omega,1} = 2.0, \quad \sigma_{k,2} = 1.0, \quad \sigma_{\omega,2} = 1.168$$

$$a_1 = 0.31, \quad \beta_{i,1} = 0.075, \quad \beta_{i,2} = 0.0828$$

ค่าคงที่ต่างๆ ที่นอกเหนือจากนี้ใช้ค่าเดียวกับแบบจำลอง  $k-\omega$  มาตรฐาน

### 3.6.2.2 เงื่อนไขขอบที่ผนังของค่า $\omega$

เงื่อนไขขอบที่ผนัง(Wall boundary conditions) สำหรับสมการ  $k$  ในแบบจำลอง  $k-\omega$  ใช้เงื่อนไขเดียวกับ enhanced wall treatments ในแบบจำลอง RNG  $k-\varepsilon$  (ดูหัวข้อ 3.7.1)

เงื่อนไขขอบที่ผนังของค่า  $\omega$  ถูกระบุโดย

$$\omega_w = \frac{\rho(u^*)^2}{\mu} \omega^+ \quad (3.83)$$

ค่า  $\omega^+$  ของการไหลในชั้นย่อยหนืดหรือการไหลชั้นย่อยแบบราบเรียบ กำหนดโดย

$$\omega^+ = \min \left( \omega_w^+, \frac{6}{\beta_i (y^+)^2} \right) \quad (3.84)$$

เมื่อ

$$\omega_w^+ = \begin{cases} \left( \frac{50}{k_s^+} \right)^2 & k_s^+ < 25 \\ \frac{100}{k_s^2} & k_s^+ \geq 25 \end{cases} \quad (3.85)$$

และ

$$k_s^+ = \max \left( 1.0, \frac{\rho k_s u^*}{\mu} \right) \quad (3.86)$$

เมื่อค่า  $k_s$  คือความสูงของความขรุขระ

ในบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ค่า  $\omega^+$  มีสมการเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega^+ = \frac{1}{\sqrt{\beta_\infty^*}} \frac{du_{\text{turb}}^+}{dy^+} \quad (3.87)$$

ซึ่งได้นำไปสู่ค่า  $\omega$  ของเซลล์ที่ผนัง ดังนี้

$$\omega = \frac{u^*}{\sqrt{\beta_\infty^*} \kappa y} \quad (3.88)$$

สำหรับกรณีของกริดเซลล์ที่ผนังถูกวางอยู่ในชั้นบัฟเฟอร์ แบบจำลองจะทำการผสมระหว่างค่า  $\omega^+$  ของการไหลในชั้นปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์กับการไหลในชั้นย่อยหนืด

### 3.7 การวิเคราะห์บริเวณใกล้ผนังสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต

แบบจำลอง  $k-\epsilon$  โดยเริ่มแรกนั้นมีความแม่นยำสำหรับการไหลปั่นป่วนในบริเวณแกนการไหล นั่นคือการไหลในบริเวณใดๆ ที่ไกลออกไปจากผนัง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาว่าแบบจำลองการไหลต้องเหมาะสมกับการไหลที่มีขอบเขตในบริเวณที่ใกล้กับผนัง โดยทั่วไปจะมี 2 วิธีในการจำลองการไหลบริเวณใกล้กับผนังคือ

(1) วิธีการใช้ฟังก์ชันผนัง(wall function approach) ซึ่งวิธีนี้อธิพลของค่าความหนืดในบริเวณการไหลชั้นย่อยหนืด ไม่ได้ถูกคำนวณโดยตรงแต่จะใช้สมการเชิงทดลองซึ่งเรียกว่าฟังก์ชันผนัง(wall functions) เป็นตัวเชื่อมระหว่างบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืดในบริเวณใกล้ผนังกับบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการใช้ฟังก์ชันผนังนั้นทำให้ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้การปรับปรุงแบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับอิทธิพลของการมีอยู่ของผนัง

(2) วิธีจำลองใกล้ผนัง(near-wall modeling approach) คือวิธีการปรับปรุงแบบจำลองความปั่นป่วนให้สามารถแก้ปัญหาบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืดด้วยการใช้กริดเซลล์ทั่วทั้งบริเวณที่อยู่ใกล้ผนังซึ่งรวมทั้งบริเวณการไหลในชั้นย่อยหนืด

วิธีของฟังก์ชันผนังนั้นเป็นวิธีที่ประหยัดทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ และเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนังในเชิงอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่เหมาะสำหรับการไหลที่อยู่ในสภาวะการไหลบางกรณีดังนี้

1. การไหลอยู่ภายใต้อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่ำที่กระจายไปทั่วทั้งโดเมนในสนามการไหล
2. การไหลที่เกิดเกรเดียนต์ของความดันอย่างรุนแรงซึ่งนำไปสู่การแยกไหลของชั้นขีดผิว
3. มีการไหลแบบ 3 มิติในบริเวณใกล้กับผนังนั้นคือเกิดการไหลแบบบิดตัวอย่างรุนแรงของชั้นขีดผิวแบบ 3 มิติ

จากสภาวะการไหลดังกล่าว สมมุติฐานของการใช้ฟังก์ชันผนังนั้นจะไม่ถูกต้อง (ซึ่งพบว่าการไหลผ่านครีบูรูปตัววีที่เรียงตัวอย่างต่อเนื่องบนพื้นผิวให้ความร้อนนั้น มีลักษณะสอดคล้องกับการไหลในกรณีดังกล่าวข้างต้น) การแก้ปัญหาคาร์ไหลดังกล่าวนี้จะใช้วิธีการจำลองใกล้ผนัง ร่วมกับการใช้จำนวนกริตเซลล์ที่เหมาะสมในบริเวณใกล้กับผนัง โดยวิธีการนี้เรียกว่า enhanced wall treatment

ถึงแม้ว่า enhanced wall treatment ถูกออกแบบให้มีความแม่นยำสำหรับการจำลองการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนัง แต่ยังคงต้องมีการสร้างกริตเซลล์ที่ใช้สำหรับการคำนวณอย่างสมบูรณ์ในบริเวณการไหลใกล้กับผนังที่ได้รับอิทธิพลของความหนืด ซึ่งเมื่อมีการใช้ enhanced wall treatment เพื่อคำนวณการไหลในชั้นย่อยหนืด ค่า  $y^+$  ที่ติดกับผนังควรมีค่าเท่ากับ 1 แต่อย่างไรก็ตามค่า  $y^+$  ที่มีค่าสูงกว่านี้และสามารถยอมรับได้คือ  $y^+ < 4$  ถึง 5

### 3.7.1 การจำลองการไหลใกล้ผนังด้วยวิธี enhanced wall treatment

วิธี enhanced wall treatment เป็นวิธีการจำลองการไหลใกล้ผนังซึ่งถูกใช้ในแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG  $k-\epsilon$  โดยมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองการไหล 2 ชั้น (two-layer model) ซึ่งวิธีนี้โดเมนการไหลทั้งหมดได้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ บริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืดกับบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ และขอบเขตของทั้งสองบริเวณนั้นสามารถหาได้โดยการใช้ระยะทางจากผนัง ซึ่งเรียกว่าเลขเรย์โนลด์ปั่นป่วน,  $Re_y$  (turbulent Reynolds number) ซึ่งมีนิยามเป็น

$$Re_y \equiv \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \quad (3.89)$$

ค่า  $y$  คือระยะทางที่วัดตั้งฉากจากผนังไปยังจุดศูนย์กลางเซลล์

ในบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์นั้น ( $Re_y \geq 200$  ซึ่ง  $Re_y^* = 200$ ) แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  มาตรฐานจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณ

ในบริเวณการไหลที่ใกล้กับผนังซึ่งได้รับอิทธิพลของความหนืด ( $Re_y < 200$ ) แบบจำลอง 1 สมการ (one-equation model) จะถูกนำมาใช้ ซึ่งมีเพียงสมการ  $k$  เท่านั้นที่ถูกใช้ในบริเวณนี้ โดยที่ค่าความหนืดปั่นป่วน,  $\mu_t$  จะคำนวณจากสมการ

$$\mu_{t,2layer} = \rho C_\mu \ell_\mu \sqrt{k} \quad (3.90)$$

เมื่อ  $\ell_\mu$  คือค่าบ่งชี้ลักษณะเชิงขนาด(length scale) คำนวณจากสมการ

$$\ell_\mu = y C_\mu^* (1 - e^{-Re_y/A_\mu}) \quad (3.91)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามของการไหล 2 ชั้น ผสมผสานกันอย่างราบรื่นกับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง และค่าของ  $\mu_t$  สำหรับการไหลด้านนอกมีสมการเป็น

$$\mu_{t,enh} = \lambda_\varepsilon \mu_t + (1 - \lambda_\varepsilon) \mu_{t,2layer} \quad (3.92)$$

เมื่อค่า  $\mu_t$  สำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูงถูกกำหนดไว้ในแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  และนอกจากนี้ ฟังก์ชันการผสมผสาน (blending function),  $\lambda_\varepsilon$  ถูกกำหนดให้เท่ากับหนึ่งสำหรับบริเวณที่ไกลจากผนัง และมีค่าเท่ากับศูนย์สำหรับบริเวณที่อยู่ใกล้กับผนังมาก ซึ่งฟังก์ชันการผสมผสานมีสมการเป็น

$$\lambda_\varepsilon = \frac{1}{2} \left[ 1 + \tanh \left( \frac{Re_y - Re_y^*}{A} \right) \right] \quad (3.93)$$

ค่าคงที่  $A$  หาจากสมการดังนี้

$$A = \frac{|\Delta Re_y|}{\tanh(0.98)} \quad (3.94)$$

โดยทั่วไปค่า  $\Delta Re_y$  ถูกกำหนดให้มีความอยู่ระหว่าง 5% ถึง 25% ของค่า  $Re_y^*$  ซึ่งวัตถุประสงค์ของการมีฟังก์ชันการผสมผสานคือป้องกันการขัดขวางการลู่เข้า เมื่อผลเฉลยจากการคำนวณจากแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  ที่ชั้นด้านนอกไม่สอดคล้องกับสมการของวิธีจำลองการไหล 2 ชั้น

ค่าของ  $\varepsilon$  ในสนามการไหลคำนวณจากสมการ

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_\varepsilon} \quad (3.95)$$

ค่า  $l_\varepsilon$  คำนวณจากสมการ

$$l_\varepsilon = y C_l^* (1 - e^{-Re_y/A_\varepsilon}) \quad (3.96)$$

ถ้าโดเมนการไหลทั้งหมดอยู่ในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืด ( $Re_y < 200$ ) ค่า  $\varepsilon$  จะไม่ได้คำนวณจากการแก้สมการการเคลื่อนย้าย แต่จะใช้ค่าในสมการที่ (3.95)

ค่าคงที่ซึ่งอยู่ในสมการค่าบ่งชี้ลักษณะเชิงขนาด มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_\ell^* = \kappa C_\mu^{-3/4}, \quad A_\mu = 70, \quad A_\varepsilon = 2C_\ell^*$$

### 3.7.2 การจำลองการไหลใกล้ผนังด้วยฟังก์ชันผนังเสริม

วิธีฟังก์ชันผนังเสริม (enhanced wall function) ซึ่งถูกใช้ในแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST  $k-\omega$  เป็นวิธีที่สามารถนำไปใช้จำลองการไหลตลอดทั่วบริเวณที่ใกล้กับผนัง นั่นคือการไหลในชั้นย่อยหนืด ชั้นบัฟเฟอร์ และบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งมีสมการที่สำคัญสำหรับกฎของผนังในสมการที่ (3.12) โดยการผสมผสานระหว่างชั้นการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน ซึ่งมีสมการเป็น

$$u^+ = e^{-\Gamma} u_{\text{lam}}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} u_{\text{turb}}^+ \quad (3.97)$$

ฟังก์ชันการผสมผสานกำหนดโดย

$$\Gamma = \frac{a(y^+)^4}{1+by^+} \quad (3.98)$$

ค่า  $a=0.01, b=5$  ค่า  $u_{\text{lam}}^+$  และ  $u_{\text{turb}}^+$  คือกฎของผนังสำหรับการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนตามลำดับ โดยที่

$$u_{\text{lam}}^+ = y^+ \left( 1 + \frac{\alpha}{2} y^+ \right) \quad (3.99)$$

และ  $u_{\text{turb}}^+$  คำนวณจาก

$$\frac{du_{\text{turb}}^+}{dy^+} = \frac{1}{\kappa y^+} \left[ S^+ (1 - \beta u^+ - \gamma (u^+)^2) \right]^{1/2} \quad (3.100)$$

เมื่อ

$$S^+ = \begin{cases} 1 + \alpha y^+ & \text{for } y^+ < y_s^+ \\ 1 + \alpha y_s^+ & \text{for } y^+ \geq y_s^+ \end{cases} \quad (3.101)$$

โดยที่ค่า  $y_s^+ = 60$  และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha \equiv \frac{v_w}{\tau_w u^+} \frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{\rho^2 (u^*)^3} \frac{dp}{dx} \quad (3.102)$$

$$\beta \equiv \frac{\sigma_t q_w u^+}{c_p \tau_w T_w} = \frac{\sigma_t q_w}{\rho c_p u^* T_w} \quad (3.103)$$

$$\gamma \equiv \frac{\sigma_t (u^*)^2}{2c_p \tau_w} \quad (3.104)$$

### 3.7.3 เงื่อนไขค่าขอบของแบบจำลองความปั่นป่วน

เงื่อนไขค่าขอบของแบบจำลองความปั่นป่วนแบ่งได้เป็น เงื่อนไขค่าขอบที่ผนังและเงื่อนไขทางเข้า มีรายละเอียดของการกำหนดค่าดังนี้

#### 3.7.3.1 เงื่อนไขค่าขอบที่ผนัง

สำหรับแบบจำลอง  $k$ - $\varepsilon$  สมการของค่า  $k$  ที่ถูกคำนวณในโดเมนของการไหลและรวมถึงเซลล์ที่ติดกับผนัง เงื่อนไขขอบของค่า  $k$  ที่ติดกับผนังมีสมการเป็น

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (3.105)$$

เมื่อค่า  $n$  คือพิกัดของตำแหน่งที่ตั้งฉากกับผนัง

เทอมของการสร้างพลังงานจลน์,  $G_k$  และอัตราการสูญเสีย,  $\varepsilon$  ของเซลล์ที่ติดกับผนัง ซึ่งเป็นเทอมของแหล่งกำเนิดในสมการ  $k$  ถูกคำนวณจากพื้นฐานของสมมุติฐานความสมดุลเฉพาะที่ (local equilibrium hypothesis) ภายใต้สมมุติฐานนี้ การสร้างค่า  $k$  และอัตราการสูญเสียของมัน ถูกสมมุติว่าเท่ากันในปริมาตรควบคุมที่ติดกับผนัง ดังนั้นการสร้างค่า  $k$  คำนวณได้จากสมการ

$$G_k = \tau_w \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{\kappa \rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P} \quad (3.106)$$

ค่า  $\varepsilon$  คำนวณได้จากสมการ

$$\varepsilon_P = \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{\kappa y_P} \quad (3.107)$$

สมการ  $\varepsilon$  ไม่ได้ถูกคำนวณที่เซลล์ที่ติดกับผนัง แต่แทนที่การคำนวณด้วยการใช้สมการที่ (3.95) และสังเกตได้ว่าเงื่อนไขขอบที่ผนังสำหรับการหาค่าผลเฉลยของตัวแปร ซึ่งรวมทั้งความเร็วเฉลี่ย, อุณหภูมิ,  $k$  และ  $\varepsilon$  ถูกกำหนดโดยฟังก์ชันผนัง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องระบุค่าเหล่านี้ที่ผนัง

### 3.7.3.1 เงื่อนไขทางเข้า

ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปแล้วจะใช้ค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  ของทางเข้าที่ได้จากผลงานตีพิมพ์ของนักวิจัย อาจมีการศึกษาผลกระทบของค่าเหล่านี้ต่อการไหลเพิ่มเติม เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของผลการจำลองที่ได้ นอกจากนี้สามารถประมาณการค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  อย่างคร่าวๆ ได้ จากความเข้มข้นของความปั่นป่วน(turbulence intensity),  $T_i$  และค่าบ่งชี้เชิงขนาด  $D$  ของช่องทางไหลโดยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$k = \frac{3}{2} (U_{ref} T_i)^2; \quad \varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\ell}; \quad \ell = 0.07 D \quad (3.108)$$

## 3.8 การจำลองการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วน

การถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วน มีสมการที่จำลองขึ้นโดยใช้แนวคิดของความคล้ายคลึงของเรย์โนลด์(Reynolds' analogy) ต่อการถ่ายเทโมเมนตัมของความปั่นป่วน ดังนั้นสมการพลังงานที่ถูกสร้างขึ้น สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i (\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3.109)$$

เมื่อค่า  $E$  คือพลังงานรวม และค่า  $k_{eff}$  คือค่าการนำความร้อนยังผล(effective thermal conductivity) โดยที่  $k_{eff} = k + k_t$  ซึ่งค่า  $k_t$  คือค่าการนำความร้อนปั่นป่วนและมีนิยามตามแบบจำลองความปั่นที่เลือกใช้ดังนี้

### 3.8.1 แบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานและแบบ $k-\omega$

สำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\varepsilon$  มาตรฐานและแบบ  $k-\omega$  นั้นค่า  $k_{eff}$  มีสมการคือ

$$k_{eff} = k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (3.110)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่า  $k$  ในกรณีนี้คือค่าการนำความร้อน และค่า  $Pr_t$  คือเลขพรานด์ของความปั่นป่วน (turbulent Prandtl Number) ซึ่งมีค่า  $Pr_t = 0.85$

### 3.8.2 แบบจำลอง RNG $k-\epsilon$

สำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองความปั่นป่วน RNG  $k-\epsilon$  นั้นค่า  $k_{eff}$  มีสมการคือ

$$k_{eff} = \alpha c_p \mu_{eff} \quad (3.111)$$

โดยที่ค่า  $\alpha$  นั้นคำนวณได้จากสมการที่ (3.27) แต่สำหรับค่า  $\alpha_0$  นั้นคำนวณจากสมการ  $\alpha_0 = 1/Pr = k/\mu c_p$

จะสังเกตได้ว่าค่า  $\alpha$  เปลี่ยนแปลงไปตามค่า  $\mu/\mu_{eff}$  ดังที่ปรากฏอยู่ในสมการที่ (3.27) ซึ่งเป็นข้อดีของแบบจำลอง RNG  $k-\epsilon$  และมีหลักฐานบ่งชี้ว่าการวิเคราะห์โดยใช้สมการที่ (3.27) มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองเมื่อค่า  $Pr_t$  เปลี่ยนแปลงไปตามค่า  $Pr$  และความปั่นป่วน โดยที่สมการที่ (3.27) นี้ใช้งานได้ดีสำหรับค่า  $Pr$  ในช่วงที่กว้างมาก ซึ่งสามารถคำนวณการถ่ายเทความร้อนได้สำหรับการไหลในบริเวณเลขเรย์โนลด์ส์ต่ำ สมการที่ (3.27) นี้ทำนายผลการเปลี่ยนแปลงได้อย่างราบรื่นของเลขพรานด์ยังผลผกผันจากค่า  $\alpha = 1/Pr$  ในบริเวณการไหลที่ได้รับอิทธิพลจากความหนืดของของไหลไปสู่ค่าของความปั่นป่วน ( $\alpha = 1.393$ ) ในบริเวณการไหลปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์

## 3.9 การไหลแบบภายในและการถ่ายเทความร้อน

การไหลแบบภายใน เช่นการไหลในช่องทางไหล หรือการไหลในท่อที่มีหน้าตัดรูปแบบต่างๆ มีเนื้อหาพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนดังนี้

### 3.9.1 สถานะการไหล

การไหลแบบภายในเช่นการไหลในท่อ มีขอบเขตจำกัดโดยที่ความหนาของชั้นขีดผิวไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เนื่องจากเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งชั้นขีดผิวจะก่อตัวเต็มหน้าตัดการไหลรูปร่างของความเร็วมักจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกว่าการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์ (fully developed flow) สำหรับช่วงการไหลก่อนหน้านั้นเรียกว่าการไหลที่กำลังปรับตัว (developing flow) และเรียกระยะของการไหลที่กำลังปรับตัวว่าความยาวขาเข้า,  $L_e$  (hydrodynamic entrance length)

สำหรับการไหลภายในนั้น เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลกำหนดโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Re = \frac{\rho u_0 D}{\mu} \quad (3.112)$$

เมื่อ  $u_0$  เป็นความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ และ  $D$  คือความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหล หรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) มีนิยามเป็น

$$D = \frac{4A_c}{P} \quad (3.113)$$

เมื่อค่า  $A_c$  และ  $P$  เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของหน้าตัดตามลำดับ

โดยทั่วไปสำหรับการไหลในท่อผิวเรียบ เลขเรย์โนลด์ส์วิกฤติของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลปั่นป่วน เริ่มต้นจาก  $Re_D > 4000$  และความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวหาได้จากสมการ

$$\left(\frac{L_c}{D}\right)_{\text{urb}} \approx 4.4 Re_D^{1/6} \quad (3.114)$$

### 3.9.2 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทาน (friction factor) ของ Moody (หรือ Darcy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ มีนิยามว่า

$$f_{\text{Darcy}} \equiv \frac{(\Delta p / L) D}{\rho u_0^2 / 2} \quad (3.115)$$

เมื่อค่า  $L$  คือช่วงความยาวที่วัดค่าความดันตกคร่อม และค่า  $f_{\text{Darcy}}$  นี้แตกต่างกับค่าตัวประกอบความเสียดทาน  $f$  ซึ่งเรียกว่าตัวประกอบความเสียดทานเพนนิง มีสมการดังนี้

$$f = \frac{f_{\text{Darcy}}}{4} \quad (3.116)$$

### 3.9.3 สถานะการถ่ายเทความร้อน

ถ้าของไหลที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอไหลเข้าไปในท่อโดยมีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขีดผิวของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสถานะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิว,  $T_s$  คงที่ หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิว,  $q_s''$  คงที่ สถานะพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ฟลักซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.117)$$

โดยที่  $T_s$  คืออุณหภูมิพื้นผิว

$T_m$  คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

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

### 3.9.4 สถานะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของของไหลต้องเปลี่ยนแปลงตามระยะ  $x$  ซึ่งสถานะการปรับตัวอย่างสมบูรณ์แล้วของอุณหภูมิจะไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิ เพื่อให้ได้เงื่อนไขของสถานะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right] = 0 \quad (3.118)$$

โดยที่  $T$  คืออุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (3.118) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่องทางไหลอาจจะเป็นกรณี  $q_s''$  คงที่หรือ  $T_s$  คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อซึ่งได้รับความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ  $q_s''$  คงที่ ส่วนกรณี  $T_s$  คงที่ที่จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสถานะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

### 3.9.5 ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน

Sripattanapipat and Promvonge (2009) นำเสนอค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อนหรือค่าสมรรถนะของการเพิ่มขึ้นทางความร้อน,  $TEF$  ซึ่งคำนวณได้จาก

$$TEF = \frac{(Nu / Nu_o)}{(f / f_o)^{1/3}} \quad (1.1)$$

## 3.10 การคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง

เพื่อต้องการลดจำนวนของกริดเซลล์และเวลาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่วงที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง(periodic flow) ซึ่งการวิเคราะห์การไหลลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อ รูปทรงทางเรขาคณิตและรูปแบบที่ต้องการหาค่าผลเฉลยของการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยธรรมชาติแล้วมีการซ้ำเป็นช่วงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงสามารถแบ่งได้เป็น การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว และการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 3.10.1 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว

การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วเป็นลักษณะการไหลเมื่อมีค่าความดันตกคร่อมเกิดขึ้นข้ามขอบเขตการไหลตามแนวทิศทางการไหล โดยเกิดขึ้นกับการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์ ลักษณะการไหลเช่นนี้มีการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตที่ซ้ำกันไปตามแนวทิศทางการไหล โดยมีรูปแบบของการไหลเกิดขึ้นซ้ำกับเป็นวงรอบ สภาวะการไหลที่ซ้ำเป็นช่วงนี้เกิดขึ้นหลังจากมีช่วงของความยาวขาเข้าที่เพียงพอ โดยขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ของการไหลและรูปร่างทางเรขาคณิตของช่องทางไหล

#### 3.10.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

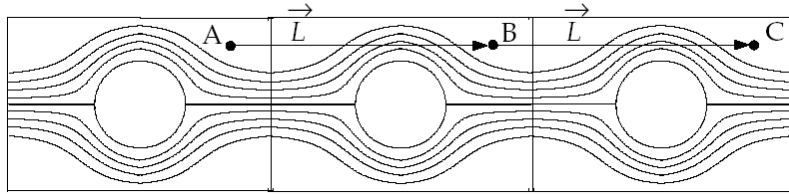
สภาวะของการไหลซ้ำเป็นช่วงเกิดขึ้นเมื่อรูปแบบการไหลเกิดขึ้นซ้ำกันในช่วงการไหล  $L$  โดยมีค่าความดันตกคร่อมคงที่ในช่วงโมดูลของการไหลตามแนวทิศทางการไหล นิยามของการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว ถูกกำหนดโดยค่าของความเร็วย่อยนั้นจะซ้ำกันโดยตัวมันเอง ดังสมการ

$$u_i(\vec{r}) = u_i(\vec{r} + \vec{L}) = u_i(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.119)$$

เมื่อ  $\vec{r}$  คือเวกเตอร์บอกตำแหน่ง และค่า  $\vec{L}$  คือเวกเตอร์ของความยาวที่ซ้ำเป็นช่วงของ

โดเมนการไหลที่พิจารณา สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของรูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง

จากรูปสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

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

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

### 3.10.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

สำหรับการไหลแบบมีความหนืด ค่าของความดันจะไม่ซ้ำเป็นช่วงตามนิยามของความเร็วตั้งในสมการที่ (3.119) แต่ค่าของความดันตกคร่อมช่วงของการไหลหรือโมดูลจะมีค่าเท่ากัน แสดงได้ดังสมการ

$$\Delta p = p(\bar{r}) - p(\bar{r} + \bar{L}) = p(\bar{r} + \bar{L}) - p(\bar{r} + 2\bar{L}) = \dots \quad (3.120)$$

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

$$\nabla p(\bar{r}) = \beta \frac{\bar{L}}{|\bar{L}|} + \nabla \tilde{p}(\bar{r}) \quad (3.121)$$

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

### 3.10.2 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน

การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนตามแนวทิศทางการไหล สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับการระบุ พลั๊กซ์ความร้อนคงที่ที่ผนัง ในการไหลเช่นนี้ค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างขอบเขตที่ซ้ำ เป็นช่วงจะมีค่าคงที่ และสัมพันธ์กับการเพิ่มความร้อนสุทธิจากขอบเขตของผนัง

เมื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นซ้ำกันเป็นช่วง สนามอุณหภูมิจะมีความคล้ายคลึงกับสนาม ของความดันในกรณีของการไหลเป็นช่วงเชิงความเร็ว โดยมีสมการดังนี้

$$\frac{T(\bar{r} + \bar{L}) - T(\bar{r})}{L} = \frac{T(\bar{r} + 2\bar{L}) - T(\bar{r} + \bar{L})}{L} = \sigma \quad (3.122)$$

เมื่อค่า  $\sigma$  คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนได้ในเทอมของการเพิ่มความร้อน ทั้งหมดภายในโดเมน,  $Q$  ดังสมการ

$$\sigma = \frac{Q}{\dot{m} c_p L} = \frac{T_{\text{bulk,exit}} - T_{\text{bulk,inlet}}}{L} \quad (3.123)$$

เมื่อค่า  $\dot{m}$  คืออัตราการไหลเชิงมวลที่กำหนดให้

และค่า  $T_{\text{bulk}}$  มีนิยามโดย

$$T_{\text{bulk}} = \frac{\int_A T |\rho \bar{u}| \cdot d\bar{A}}{\int_A |\rho \bar{u}| \cdot d\bar{A}} \quad (3.124)$$

เมื่อ  $T_{\text{bulk}}$  อินทิเกรตตลอดพื้นที่หน้าตัดของโดเมนการไหลที่ซ้ำเป็นช่วง,  $A$

### 3.11 รูปแบบทั่วไปของสมการควบคุมการไหล

สมการควบคุมการไหลทั้งหมดสามารถจัดรูปแบบใหม่และแสดงในรูปแบบมาตรฐานซึ่งได้ รวมถึงเทอมของการพา(convection term) เทอมของการแพร่(diffusion term) และเทอมของการ ก่อกำเนิด(source term) สำหรับการไหล 3 มิติ แสดงได้ดังนี้

$$\bar{\nabla} \cdot (\rho \phi \bar{u}) = \bar{\nabla} \cdot (\Gamma_\phi \bar{\nabla} \phi) + S_\phi \quad (3.125)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\phi$  แสดงถึงตัวแปรแสดงคุณสมบัติใดๆ ของของไหล และเรียกสมการที่ (3.125) ว่า สมการการเคลื่อนย้ายของคุณสมบัติ  $\phi$  ซึ่งพบว่าสามารถอธิบายการเคลื่อนย้ายของปริมาณทางฟิสิกส์ที่แตกต่างกันได้ คือเทอมของการพาอยู่ด้านซ้ายมือของสมการ เทอมของการแพร่ ( $\Gamma_\phi$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่) และเทอมของการก่อกำเนิด ( $S_\phi$ ) อยู่ด้านขวามือตามลำดับ โดยได้ซ่อนเทอมซึ่งไม่เหมือนกันไว้ในเทอมของการก่อกำเนิดนั่นเอง

สมการที่ (3.125) สามารถใช้เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับขั้นตอนการคำนวณในวิธีปริมาตรสืบเนื่องโดยกำหนด  $\phi$  เท่ากับ 1 (สำหรับสมการความต่อเนื่อง)  $U$ ,  $V$  และ  $W$  (สำหรับสมการโมเมนต์)  $i$  หรือ  $T$  (สำหรับสมการพลังงาน) และ  $k$ ,  $\varepsilon$  หรือ  $k$ ,  $\omega$  (สำหรับสมการแบบจำลองความปั่นป่วน) และเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่  $\Gamma_\phi$  และเทอมของการก่อกำเนิด ซึ่งจะได้อุปแบบพิเศษของสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ทั้ง 7 สมการ ประกอบด้วยสมการอนุรักษ์มวล สมการโมเมนต์มี 3 สมการ สมการพลังงาน และสมการแบบจำลองความปั่นป่วนมี 2 สมการ ทั้งนี้ขั้นตอนหลักของวิธีปริมาตรสืบเนื่องคือการอินทิเกรตสมการ (3.125) ทั่วทั้งปริมาตรควบคุม (control volume, CV) 3 มิติ ซึ่งทำได้

$$\int_{CV} \nabla \cdot (\rho \phi \bar{u}) dV = \int_{CV} \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (3.126)$$

การอินทิเกรตเชิงปริมาตรในเทอมที่สองด้านซ้ายมือคือเทอมการพา และในเทอมแรกทางขวามือคือเทอมของการแพร่ โดยสามารถเขียนได้ใหม่เป็นการอินทิเกรตเชิงพื้นผิวของปริมาตรควบคุม โดยประยุกต์ทฤษฎี Gauss' divergence กับสมการ (3.126) ทำให้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\int_A \rho \phi \bar{u} \cdot d\bar{A} = \int_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\bar{A} + \int_{CV} S_\phi dV \quad (3.127)$$

### 3.12 สมการแปลงรูป

สมการที่ (3.127) นำไปใช้คำนวณสำหรับในแต่ละปริมาตรควบคุมหรือเซลล์ในโดเมนของการคำนวณ ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้ระเบียบวิธีที่เรียกว่าระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องหรือไฟไนต์วอลุ่ม สมการแปลงรูป (Discretised equation) ในแต่ละเซลล์แสดงได้ดังสมการ

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f \bar{u}_f \phi_f \cdot \bar{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \bar{A}_f + S_\phi V \quad (3.128)$$

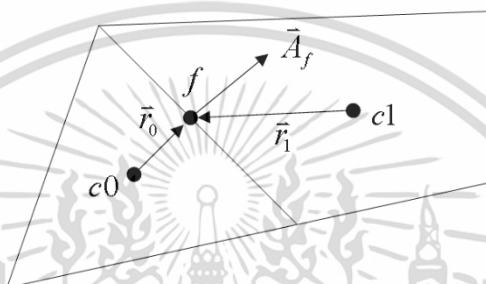
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

 $N_{faces}$  = จำนวนหน้าของผิวเซลล์ที่ล้อมรอบเซลล์

 $\phi_f$  = ค่าของ  $\phi$  ที่ถูกพาผ่านผิวเซลล์  $f$ 
 $\rho_f \bar{u}_f \cdot \bar{A}_f$  = อัตราการไหลเชิงมวลที่ผ่านผิวเซลล์

 $\bar{A}_f$  = เวกเตอร์พื้นที่ผิวของ  $f$ ,  $|\bar{A}_f| = |A_x \hat{i} + A_y \hat{j}|$  ในแบบ 2 มิติ

 $\bar{\nabla} \phi_f$  = เกรเดียนต์ของ  $\phi$  ที่ผิวเซลล์  $f$ 
 $V$  = ปริมาตรของเซลล์


รูปที่ 3.2 ปริมาตรควบคุมสำหรับใช้อธิบายสมการแปลงรูป

สมการแปลงรูปที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาผลเฉลย มีรูปทั่วไปที่เหมือนกันดังแสดงไว้ในสมการที่ (3.128) โดยที่ในสมการนี้มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ  $\phi$  ที่ศูนย์กลางเซลล์และค่าของตัวแปรที่อยู่ล้อมรอบเซลล์นั้น โดยทั่วไปแล้วสมการนี้จะเป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น(non-linear) การทำสมการนี้ให้เป็นเชิงเส้น(linearized) สามารถเขียนได้เป็น

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.129)$$

เมื่อตัวห้อย nb แสดงถึงเซลล์ข้างเคียง ค่า  $a_p$  และ  $a_{nb}$  คือสัมประสิทธิ์ความเป็นเชิงเส้น (linearized coefficients) สำหรับค่า  $\phi$  และ  $\phi_{nb}$  ตามลำดับ ซึ่งจำนวนค่าข้างเคียง ( $\phi_{nb}$ ) ของแต่ละเซลล์ขึ้นอยู่กับลักษณะของกริดเซลล์ที่ใช้และโดยทั่วไปจะเท่ากับจำนวนผิวเซลล์ที่ล้อมรอบเซลล์นั้น

สมการเดียวกันนี้สามารถเขียนขึ้นได้สำหรับแต่ละเซลล์ในโดเมนการไหล ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ในกลุ่มของสมการพีชคณิตเหล่านี้จะถูกจัดเก็บในเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ สำหรับกลุ่มของสมการเชิงเส้นเหล่านี้จากกล่าวว่าการสร้างระบบสมการแปลงรูปนี้ขึ้นมาเพื่อทำให้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนอยู่ในรูปของสมการพีชคณิตอย่างง่าย และสามารถนำไปใช้กับการคำนวณด้วยระบบคอมพิวเตอร์ได้ สมการแปลงรูปนี้จะถูกนำมาประกอบเป็นระบบสมการขนาดใหญ่ ซึ่งขนาดของสมการขึ้นอยู่กับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้น ระบบสมการขนาดใหญ่สามารถเขียนอยู่ในรูปของระบบเมทริกซ์ได้ และวิธีการหาคำตอบของระบบเมทริกซ์ขนาดใหญ่จะใช้วิธีการแก้ระบบสมการเชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีการทำซ้ำ

โดยทั่วไปค่าของตัวแปร  $\phi$  จะเป็นค่าที่ศูนย์กลางเซลล์ แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ผิวเซลล์,  $\phi_f$  ซึ่งต้องการคำนวณสำหรับเทอมของการพาในสมการที่ (3.128) จะได้มาจากการประมาณค่าที่ศูนย์กลางเซลล์ ซึ่งทำได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าต้นลม (upwind scheme) ซึ่งวิธีการประมาณค่าต้นลมคือวิธีที่ค่า  $\phi_f$  ได้มาจากค่าของเซลล์ที่อยู่ต้นลมโดยสัมพันธ์กับทิศทางของความเร็วที่ตั้งฉาก  $u_n$  ของสมการที่ (3.128) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ทั้งวิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับหนึ่ง (first-order upwind, FOU), การประมาณค่าต้นลมอันดับสอง (second-order upwind, SOU) และแบบ QUICK เพื่อใช้เปรียบเทียบถึงความเหมาะสมของแต่ละวิธี สำหรับเทอมของการแพร่จะใช้ผลต่างศูนย์กลาง (central-differenced) ซึ่งโดยปกติแล้วมีค่าความแม่นยำอันดับสอง

### 3.12.1 การประมาณค่าเทอมของการพา

วิธีการประมาณค่า  $\phi_f$  ซึ่งอยู่ในเทอมของการพาที่ใช้ในงานวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยนี้แสดงได้ดังต่อไปนี้

#### 3.12.1.1 วิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับหนึ่ง

สำหรับวิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับหนึ่งนั้น ค่าที่ผิวเซลล์หาโดยการสมมติว่าค่าที่ศูนย์กลางเซลล์ของตัวแปรใดๆ ในสนามการไหล จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของเซลล์และถือว่าเป็นค่าเดียวกันตลอดทั้งเซลล์ และปริมาณที่ผิวเซลล์นี้จะมีความเกี่ยวข้องกับค่าของเซลล์ ดังนั้นเมื่อใช้วิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับหนึ่ง ค่าของผิวเซลล์  $\phi_f$  จะถูกกำหนดให้เท่ากับค่า  $\phi$  ที่ศูนย์กลางเซลล์ของเซลล์ที่อยู่ต้นทางการไหล

#### 3.12.1.2 วิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับสอง

วิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับสองนั้น ปริมาณที่ผิวเซลล์จะถูกคำนวณในระดับความแม่นยำที่สูงขึ้น โดยค่าที่ผิวเซลล์นั้นจะหาได้จากการใช้อนุกรมขยายของเทเลอร์ กระจายค่าของศูนย์กลางเซลล์รอบๆ จุดเซนทรอยด์ของเซลล์ ดังนั้นค่าที่ผิวเซลล์  $\phi_f$  ถูกคำนวณโดยใช้สมการดังนี้

$$\phi_{f,SOU} = \phi + \nabla \phi \cdot \bar{r} \quad (3.130)$$

เมื่อค่า  $\phi$  และ  $\nabla \phi$  คือค่าที่ศูนย์กลางเซลล์และค่าเกรเดียนต์ของ  $\phi$  ที่ต้นทางการไหลของเซลล์ และ  $\bar{r}$  คือค่าเวกเตอร์บอกตำแหน่งจากจุดเซนทรอยด์ของเซลล์ต้นทางการไหลไปสู่จุดเซนทรอยด์ของผิวเซลล์ ซึ่งสมการนี้ต้องการค่าเกรเดียนต์  $\nabla \phi$  ในแต่ละเซลล์ และนอกจากนี้การหาค่าเกรเดียนต์  $\nabla \phi$  ยังได้ถูกนำไปใช้ในเทอมของการแพร่อีกด้วย ซึ่งหาได้จากทฤษฎี Green-Gauss เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีนี้เป็นวิธีการคำนวณค่าเกรเดียนต์ที่ศูนย์กลางเซลล์  $c_0$  มีสมการดังนี้

$$(\bar{\nabla} \phi)_{c_0} = \frac{1}{V} \sum_f \bar{\phi}_f \bar{A}_f \quad (3.131)$$

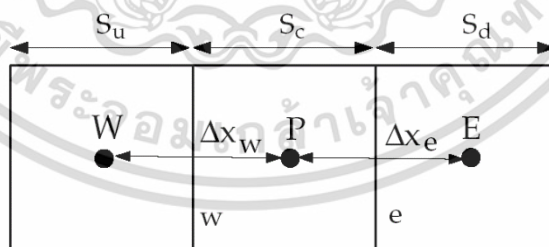
เมื่อค่า  $\bar{\phi}_f$  คือค่า  $\phi$  ของจุดเซนทรอยด์ของผิวเซลล์ ซึ่งผลรวมนี้เป็นการรวมตลอดทั่วทั้งผิวเซลล์ที่ล้อมรอบเซลล์นั้น โดยที่ค่า  $\bar{\phi}_f$  นั้นคำนวณจากสมการ

$$\bar{\phi}_f = \frac{\phi_{c_0} + \phi_{c_1}}{2} \quad (3.132)$$

### 3.12.1.3 วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK

วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) ใช้สำหรับการคำนวณค่าที่ผิวเซลล์  $\phi_f$  ที่มีอันดับความแม่นยำที่สูงขึ้น โดยใช้พื้นฐานของการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของวิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับสอง ร่วมกับวิธีการประมาณค่าของตัวแปรที่ศูนย์กลาง สำหรับผิวเซลล์  $e$  ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งถ้ามีการไหลจากด้านซ้ายไปด้านขวา ค่าที่ผิวเซลล์  $e$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\phi_e = \theta \left[ \frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_P + \frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[ \frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \right] \quad (3.133)$$



รูปที่ 3.3 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ

เมื่อค่า  $\theta=1$  สมการที่ (3.133) จะกลายเป็นสมการของการประมาณค่าในช่วงที่ศูนย์กลางอันดับสอง (central second-order interpolation) ในขณะที่  $\theta=0$  จะได้สมการของการประมาณค่าต้นลมอันดับสอง ซึ่งโดยทั่วไปสำหรับวิธีการประมาณค่าแบบ QUICK นั้นจะกำหนดให้  $\theta=1/8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.12.2 การแปลงรูปสมการโมเมนตัม

สมการสำหรับการแปลงรูปสมการโมเมนตัม จะใช้สมการที่ (3.129) ยกตัวอย่างเช่น สมการโมเมนตัมในแนวแกน  $x$  จะกำหนดให้  $\phi = u$  ซึ่งจะได้

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f A \cdot i \quad (3.134)$$

สำหรับระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมจะพิจารณาอัตราเปลี่ยนแปลงความดัน เป็นเทอมแหล่งกำเนิด (source term) เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ควบคู่กัน (couple relation) ระหว่างสมการอนุรักษ์มวลและสมการนาเวียร์-สโตกส์ด้วยตัวแปรความเร็ว ดังนั้นหากทราบค่าของความดันที่ถูกต้องแล้ว ผลเฉลยของสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบอัดไม่ได้จะต้องสอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวลด้วย

ถ้าค่าของสนามความดันและอัตราการไหลเชิงมวลนั้นทราบค่า สมการที่ (3.134) ก็จะสามารถแก้สมการหาค่าของสนามความเร็วได้ แต่ค่าของสนามความดันและอัตราการไหลเชิงมวลนั้นยังไม่ทราบค่ามาก่อนและจะต้องได้มาจากส่วนหนึ่งของผลเฉลย ซึ่งมีสิ่งสำคัญที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของการเก็บค่าความดันและการแปลงรูปเทอมเกรเดียนต์ของความดัน โดยทั่วไปการหาค่าของสนามความดันจะใช้แบบแผนตำแหน่งร่วม (co-located scheme) ซึ่งเป็นการเก็บค่าของความเร็วและความดันที่ศูนย์กลางเซลล์ แต่อย่างไรก็ตามสมการที่ (3.134) ต้องการค่าของความดันที่ผิวเซลล์ที่อยู่ระหว่างเซลล์  $c0$  และ  $c1$  ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังนั้นจึงต้องการแบบแผนการประมาณค่าในช่วงสำหรับการคำนวณค่าความดันที่ผิวเซลล์จากค่าที่ศูนย์กลางเซลล์

โดยทั่วไปแบบแผนในการประมาณค่าในช่วงของความดันที่ผิวเซลล์ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ในสมการโมเมนตัม มีสมการเป็น

$$p_f = \frac{\frac{p_{c0}}{a_{p,c0}} + \frac{p_{c1}}{a_{p,c1}}}{\frac{1}{a_{p,c0}} + \frac{1}{a_{p,c1}}} \quad (3.135)$$

สมการนี้ใช้ได้ผลดีสำหรับการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างราบรื่น แต่หากการกระจายตัวของความดันเปลี่ยนแปลงไปมาก หรือเกิดพฤติกรรมความดันกระเพื่อม (pressure fluctuation) ซึ่งเรียกว่าปัญหากระดานหมากรุก (checker-board problem) การประมาณค่าโดยใช้วิธีตำแหน่งร่วมจะไม่เหมาะสม ซึ่งอาจแก้ไขโดยการเพิ่มจำนวนกริดเซลล์ให้มากขึ้นในบริเวณนั้น หรือใช้วิธีการวางตำแหน่งของกริดเซลล์สำหรับคำนวณความเร็วและความดันให้เหลื่อมกันซึ่งเรียกว่าระบบพิกัดแบบกริดเอียง (Staggered grid)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.12.3 การแปลงรูปสมการความต่อเนื่อง

อินทิเกรตสมการความต่อเนื่องตลอดปริมาตรควบคุมดังรูปที่ 3.2 จะได้สมการแปลงรูปดังนี้

$$\sum_f^{N_{faces}} J_f A_f = 0 \quad (3.136)$$

เมื่อ  $J_f = \rho u_n$  คือฟลักซ์ของมวลที่พุ่งผ่านผิว  $f$  โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าของความเร็วที่ผิว,  $\bar{u}_n$  กับค่าของความเร็วที่ศูนย์กลางเซลล์ และการประมาณค่าในช่วงของความเร็วที่ศูนย์กลางเซลล์ไปสู่ค่าที่ผิวเซลล์ในปัญหากระดานหมากรุกของความดัน จะมีวิธีการป้องกันการเกิดปัญหานี้โดยค่าของความเร็วที่ผิวจะไม่ได้คำนวณจากการเฉลี่ยแบบเชิงเส้น แต่จะทำการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักโมเมนตัม (momentum-weighted averaging) ซึ่งตัวประกอบของการถ่วงน้ำหนัก จะมีพื้นฐานมาจากค่าสัมประสิทธิ์  $a_p$  จากสมการที่ (3.129) ซึ่งค่า  $J_f$  จะคำนวณได้จากสมการ

$$J_f = \rho_f \frac{a_{p,c0} u_{n,c0} + a_{p,c1} u_{n,c1}}{a_{p,c0} + a_{p,c1}} + d_f \left( (p_{c0} + (\nabla p)_{c0} \cdot \vec{r}_0) - (p_{c1} + (\nabla p)_{c1} \cdot \vec{r}_1) \right)$$

หรือ

$$J_f = \hat{J}_f + d_f (p_{c0} - p_{c1}) \quad (3.137)$$

เมื่อ  $p_{c0}, p_{c1}$  และ  $u_{n,c0}, u_{n,c1}$  คือค่าของความดันที่เซลล์และค่าความเร็วตั้งฉาก ตามลำดับ โดยสังเกตได้ในรูปที่ 3.2 และค่า  $\hat{J}_f$  จะมีอิทธิพลต่อค่าความเร็วในเซลล์นี้ และเทอม  $d_f$  เป็นฟังก์ชันของ  $\bar{a}_p$  ซึ่งค่า  $\bar{a}_p$  คือการเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์  $a_p$  ในสมการโมเมนตัม

### 3.12.4 การคู่ควบของความเร็วและความดัน

หากทราบค่าสนามความดัน สมการโมเมนตัมที่แปลงรูปแล้วในสมการที่ (3.134) สามารถนำมาใช้ในการหาสนามการไหลได้ และถ้าสนามความดันมีความถูกต้องผลเฉลยของสนามการไหลที่คำนวณได้ก็จะจะเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์มวล แต่ถ้าหากไม่ทราบค่าสนามความดันก็จำเป็นต้องหาวิธีการคำนวณค่าสนามความดัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ขั้นตอนการเดาและการแก้ไขค่าในการคำนวณหาค่าความดัน ซึ่งในวิธีนี้จะเริ่มจากการเดาสนามความดัน ทำการหาค่าตอบของสมการโมเมนตัมและสมการค่าแก้ของสนามความดันที่แปลงมาจากสมการความต่อเนื่อง เมื่อได้ค่าแก้

ดังกล่าวแล้วนำมาปรับปรุงค่าของสนามความดันและสนามความเร็วได้ นำสนามความเร็วและสนามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันที่ได้ใหม่นั้นไปใช้ในการป้อนเข้าในสมการโมเมนตัมและสมการค่าแก้ของความดันอีก และเมื่อทำซ้ำจนกระทั่งคำตอบทั้งหมดลู่เข้าก็จะได้สนามความเร็วและสนามความดันที่เป็นไปตามกฎการเคลื่อนย้ายโมเมนตัมและกฎการอนุรักษ์มวล

กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE นั้น เริ่มต้นจากการเดาค่าสนามความดัน  $p^*$  ตลอดทั้งโดเมนการไหล จากนั้นจะทำการหาค่าฟังก์ชันที่ผิว  $J_f^*$  จากสมการที่ (3.137) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f(p_{c0}^* - p_{c1}^*) \quad (3.138)$$

ซึ่งหากไม่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง จะดำเนินการแก้ไขโดยการนิยามเทอม  $J_f'$  ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าฟังก์ชันที่ผิวที่ถูกต้องกับค่าฟังก์ชันที่ผิวที่เดาขึ้น ดังนี้

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad (3.139)$$

เพื่อให้สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง วิธีแบบ SIMPLE จะตั้งสมมติฐานของเทอม  $J_f'$  ในรูปของ

$$J_f' = d_f(p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.140)$$

เมื่อค่า  $p'$  คือค่าแก้ของความดัน

วิธีแบบ SIMPLE จะแทนค่าของสมการที่ (3.139) และ (3.140) ลงในสมการของความต่อเนื่องที่แปลงรูปแล้วคือสมการที่ (3.136) ซึ่งจะนำไปสู่สมการแปลงรูปของค่า  $p'$  ในเซลล์ ดังสมการ

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \quad (3.141)$$

เมื่อเทอมของแหล่งกำเนิด  $b$  คืออัตราการไหลสุทธิเข้าสู่เซลล์ แสดงได้ดังสมการ

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f \quad (3.142)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการค่าแก้ของความดัน ( $p'$ ) ตั้งในสมการที่ (3.141) สามารถแก้สมการได้โดยใช้วิธีระเบียบวิธีการทำซ้ำ และเมื่อได้ค่าของผลเฉลยแล้วค่าความดันของเซลล์และฟลักซ์ที่ผิวเซลล์ที่ถูกต้องคือ

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (3.143)$$

$$J_f = J_f^* + d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.144)$$

โดยที่ค่า  $\alpha_p$  คือตัวประกอบภายใต้การผ่อนคลาย (under-relaxation) สำหรับความดัน

### 3.13 การหาคำตอบของสมการแปลงรูป

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงวิธีการแปลงรูปสมการควบคุมการไหล กระบวนการนี้ให้ผลลัพธ์เป็นระบบสมการพีชคณิตเชิงเส้นที่จำเป็นต้องแก้สมการเพื่อหาคำตอบ ความซับซ้อนและขนาดของกลุ่มสมการขึ้นอยู่กับมิติของปัญหา จำนวนของกริดเซลล์ และวิธีการแปลงรูป โดยทั่วไปการหาคำตอบของสมการพีชคณิตมีอยู่ 2 วิธีคือ วิธีตรงและวิธีอ้อมหรือเรียกว่าระเบียบวิธีการทำซ้ำ ตัวอย่างของวิธีตรงคือกฎของคราเมอร์ (Cramer's rule) และการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian Elimination) ซึ่งใช้ทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ค่อนข้างมาก

ระเบียบวิธีการทำซ้ำมีพื้นฐานจากการประยุกต์ของลำดับขั้นตอนการแก้ปัญหาอย่างง่าย โดยเริ่มจากการเดาค่าของผลลัพธ์แล้วทำการคำนวณซ้ำจนนำไปสู่การลู่เข้าหาคำตอบ ซึ่งมีข้อดีคือเป็นวิธีการที่ประหยัดทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ได้มาก ในงานวิจัยนี้หาคำตอบของระบบเมทริกซ์ขนาดใหญ่โดยใช้วิธีที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการแก้ระบบสมการเชิงเส้นด้วยระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบเกาส์-ไฮเดล (Gauss-Seidel method) เพื่อแก้ระบบสมการเชิงเส้นที่มีสมการคือ

$$a_{ij} x_j = b_i \quad (1.145)$$

ระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบเกาส์-ไฮเดล สมการการกวาดแบบเดินหน้า (forward sweep) มีสมการเป็น

$$x_i^{k+1/2} = \left( b_i - \sum_{j<i} a_{ij} x_j^{k+1/2} - \sum_{j>i} a_{ij} x_j^k \right) / a_{ij} \quad (1.146)$$

เมื่อ  $i = 1, \dots, N$  และ  $N$  คือจำนวนของตัวแปร

สำหรับสมการการกวาดแบบย้อนกลับ (backward sweep) มีสมการเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_i^{k+1} = \left( b_i - \sum_{j<i} a_{ij} x_j^{k+1/2} - \sum_{j>i} a_{ij} x_j^{k+1} \right) / a_{ij} \quad (1.147)$$

ผู้ที่สนใจรายละเอียดของระเบียบวิธีการทำซ้ำและเนื้อหาต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Versteeg and Malalasekera (1995)

เมื่อทำการคำนวณซ้ำจนค่าของตัวแปรต่างๆ ลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ โดยมีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้คือ  $\epsilon$  ซึ่งเป็นเงื่อนไขของการหยุดการคำนวณซ้ำ แสดงดังสมการ

$$\left| \frac{x_i^{k+1} - x_i^k}{x_i^{k+1}} \right| \times 100 < \epsilon \quad (3.148)$$

### 3.14 โครงสร้างที่เชื่อมโยงกัน

กระแสวน (vortex) คือการเคลื่อนที่แบบหมุนวนของของไหลรอบบริเวณศูนย์กลาง สำหรับการแสดงให้เห็นภาพของกระแสวนในการไหลแบบ 3 มิติ นั้น มีหลายวิธีในการแสดงลักษณะของกระแสวนที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการตรวจจับโครงสร้างที่เชื่อมโยงกัน (coherent structures) ที่มีพื้นฐานมาจากค่า  $\lambda_2$  ซึ่งได้มีการนำเสนอไว้ในงานของ Jeong and Hussain (1995)

พวกเขาได้เสนอนิยามของกระแสวนในรูปแบบที่อ้างอิงนิยามของค่า  $\lambda_2$  โดยแยกเทนเซอร์เกรเดียนต์ของความเร็ว (velocity gradient tensor),  $\frac{\partial U_i}{\partial x_j}$  ออกเป็นสองส่วนดังสมการ

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.149)$$

เมื่อ

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.150)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.151)$$

เมื่อเทนเซอร์  $S_{ij}$  และ  $\Omega_{ij}$  คือส่วนสมมาตรและส่วนไม่สมมาตรของเทนเซอร์เกรเดียนต์ของความเร็ว หรืออาจจะเรียกว่าเทนเซอร์ของอัตราการเสียรูป (rate of deformation tensor หรือ strain-rate tensor) และเทนเซอร์ของความวน (vorticity tensor) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พวกเขาพยายามกระแสนว่าเป็นบริเวณที่ถูกเชื่อมโยงกันเมื่อค่า  $S_{ij}S_{ji} + \Omega_{ij}\Omega_{ji}$  มีค่าไอเกน (eigenvalues) 2 ค่าที่เป็นลบ เนื่องจากค่า  $S_{ij}S_{ji} + \Omega_{ij}\Omega_{ji}$  เป็นจำนวนจริงและสมมาตร ดังนั้นจะมีค่าไอเกนเป็นจำนวนจริงเท่านั้น และเมื่อกำหนดให้  $\lambda_1, \lambda_2$  และ  $\lambda_3$  เป็นค่าไอเกนของ  $S_{ij}S_{ji} + \Omega_{ij}\Omega_{ji}$  โดยที่  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$  ซึ่งถ้า  $\lambda_2$  มีค่าเป็นลบที่จุดๆ หนึ่งในสนามการไหล ดังนั้นที่จุดๆ นั้นจะเป็นส่วนหนึ่งของแกนกระแสน(vortex core)

โครงสร้างของการหมุนวนสามารถแสดงให้เห็นได้ในมุมมองของพื้นผิวที่ให้ค่าเหมือนกัน (iso-surface) ของค่าคงที่  $\lambda_2$  เมื่อค่านี้เป็นจำนวนจริงและมีค่าเป็นลบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล

### 4.1 บทนำ

การจำลองการถ่ายเทความร้อนและสภาวะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านวงแหวนแบบต่างๆ นอกจากความเข้าใจทางทฤษฎีพื้นฐาน ยังต้องมีความเข้าใจทางด้านการคำนวณเชิงตัวเลข เนื่องจากเป็นเครื่องมือหลักสำหรับการหาผลเฉลย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ หัวข้อ 4.2 กล่าวถึงประวัติและพัฒนาการโดยย่อของวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข หัวข้อ 4.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นแนวทางสากลที่ใช้โดยทั่วไป หัวข้อ 4.4 อธิบายคุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ความผิดพลาดของสมการดิสมิทไฮต์ หัวข้อ 4.5 กล่าวถึงรูปแบบการจัดวางกริดและสอดคล้องความหมายของตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในบทนี้ หัวข้อ 4.6 จะกล่าวถึงการดิสมิทไฮต์สมการอนุพันธ์อันดับสองและหัวข้อ 4.7 กล่าวถึงการดิสมิทไฮต์สมการนาเวียร์-สโตกส์

### 4.2 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

วิวัฒนาการของการคำนวณเชิงตัวเลขเริ่มมาก่อนปี ค.ศ. 1950 เกิดขึ้นขึ้นพร้อมกับยุคที่ระบบคอมพิวเตอร์เริ่มมีการพัฒนา ช่วงเวลานั้นระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference methods, FDM) และระเบียบวิธีผลต่างมูลฐาน (Finite element methods, FEM) เป็นวิธีพื้นฐานในการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations, PDE) ซึ่งนิยมใช้มากในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics, CFD) ต่อมาได้รวบรวมเอาองค์ความรู้ทางระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและระเบียบวิธีผลต่างมูลฐานเข้าไว้ด้วยกันเรียกว่า ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume methods, FVM) ทำให้มีโครงสร้างที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น ขณะที่ยังมีความแม่นยำสูง จนเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

### 4.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

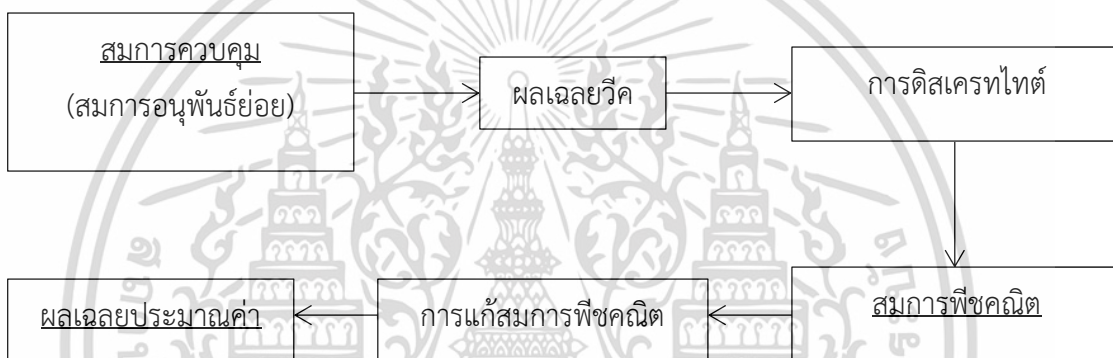
หากพิจารณาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในมุมมองการใช้โปรแกรม จะกล่าวได้ว่าเป็นโครงสร้างของอัลกอริทึมที่สามารถนำไปสู่การจำลองสภาวะการไหลได้ โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในเชิงพาณิชย์ ส่วนมากมีระบบที่ให้ผู้ใช้งานสามารถป้อนค่าต่างๆที่ต้องการแล้วจึงนำไปคำนวณ โดยแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

#### 4.3.1 ขั้นตอนประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นก่อนประมวลผล (Pre-processing) คือ ขั้นตอนเตรียมการ โดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหาและพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1. กำหนดรูปทรงและระบุนขนาดของระบบที่สนใจ เรียกว่า การกำหนดสนามการคำนวณ (Computation domain)
2. กำหนดจำนวนและรูปแบบการจัดวางกริด (Grid or Mesh) ซึ่งคือการแบ่งสนามการคำนวณออกเป็นปริมาตรเล็กๆ รูปแบบการจัดแบ่งและการจัดวางกริดที่เหมาะสมจะทำให้การหาผลเฉลยประมาณค่า (Approximation solution) แม่นยำขึ้น
3. เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมกับธรรมชาติของปัญหา
4. กำหนดคุณสมบัติของของไหล เช่น พิจารณาของไหลเป็นอากาศที่อุณหภูมิปกติ เป็นต้น
5. กำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) และค่าเริ่มต้น (Initial condition)



รูปที่ 4.1 ความเชื่อมโยงของกระบวนการดิสครีไทต์และผลเฉลยประมาณค่า

#### 4.3.2 ขั้นประมวลผล

ขั้นประมวลผล (Solving) เป็นขั้นที่ต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งการคำนวณในงานวิจัยนี้ทั้งหมดใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยมีส่วนตอนดังนี้ (จากรูปที่ 4.1)

1. ประมาณตัวแปรไม่ทราบค่าโดเมนค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน (มักใช้ในปัญหาแบบป็นป่วน) สร้างเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย โดยรวมกับสมการควบคุมการไหล
2. หาผลเฉลยวีค (Weak solution) ของสมการควบคุมด้วยวิธีน้ำหนักตกค้าง (Weight residual) จากนั้นดิสครีไทต์ โดยประมาณแต่ละเทอมความสัมพันธ์ด้วยแบบแผนวิธีที่เลือกไว้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นสมการพีชคณิต
3. แก้สมการพีชคณิต ผลเฉลยที่ได้เรียกว่า ผลเฉลยประมาณค่า

#### 4.3.3 ขั้นแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นแสดงผล (Post-processing) คือการแสดงผลเฉลยประมาณค่าของตัวแปรที่สนใจและใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ เช่น รูปแบบความเร็ว รูปแบบวอเทคซิติ เป็นต้น

#### 4.4 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติ ควรตระหนักว่าธรรมชาติมักมีพฤติกรรมซับซ้อน ดังนั้นสิ่งที่พึงระวังอย่างยิ่งคือ ความถูกต้องของผลเฉลย ผลการคำนวณที่ดีที่สุด 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) เรียกความผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณซ้ำว่าความผิดพลาดแบบเราวออฟ (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.4 ความจำกัดขอบ

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

#### 4.4.5 การอนุรักษ์

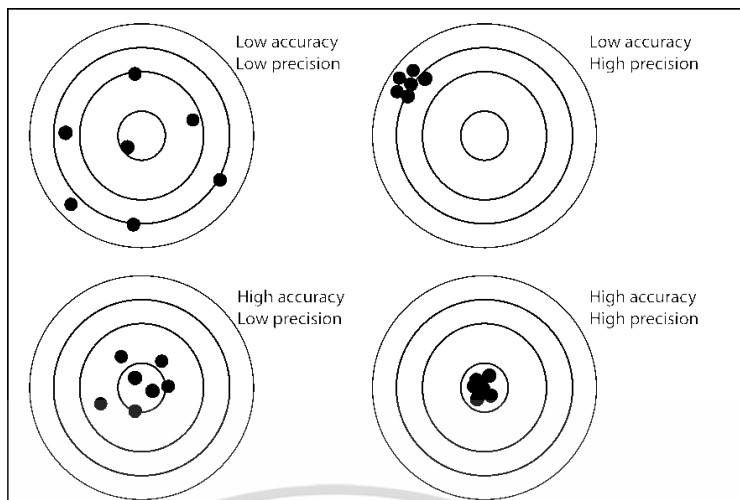
คุณสมบัติการอนุรักษ์ (Conservation) เป็นคุณสมบัติที่มีอยู่ในกฎการอนุรักษ์ เนื่องจากผลการคำนวณมีที่มาจากสมการควบคุม ดังนั้นวิธีการคำนวณจึงควรมีคุณสมบัตินี้ด้วย โดยคุณสมบัติการอนุรักษ์เป็นจุดเด่นที่สำคัญของระเบียบวิธีปริมาตรสลับเนื่อง กล่าวคือคำนึงถึงความสมดุลของการส่งถ่ายปริมาณข้ามขอบเขตที่พิจารณา เช่น รอบผิวปิดเชิงปริมาตรเล็กๆที่แบ่งตามระยะกริด เป็นต้น

#### 4.4.6 ความเสมือนจริง

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

#### 4.4.7 ความแน่นอน

บ่อยครั้งในทางวิศวกรรมกล่าวถึงความแน่นอน (Accuracy) ซึ่งมักใช้สับสนกับความแม่นยำ (Precision) พิจารณารูปที่ 4.2 แสดงความแตกต่างระหว่างแนวคิดทั้งสองอย่างชัดเจน ตรงกลางเป้าเป็นเสมือนค่าแม่นยำ โดยเห็นได้ว่าความแน่นอนสูงหมายถึงค่าเฉลี่ยไม่ต่างจากค่าแม่นยำ และความแม่นยำสูงหมายถึงค่าส่วนใหญ่กระจายตัวน้อย ดังนั้นงานวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมจึงควรให้ความสำคัญกับความแน่นอนมากกว่าความแม่นยำ ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์ที่ได้ถูกต้อง มีแนวโน้มเดียวกับสภาพความจริงมากขึ้น แต่ในงานออกแบบต้องการความผิดพลาดน้อยที่สุด จึงควรใช้ทั้ง 2 แนวคิดประกอบรวมกัน



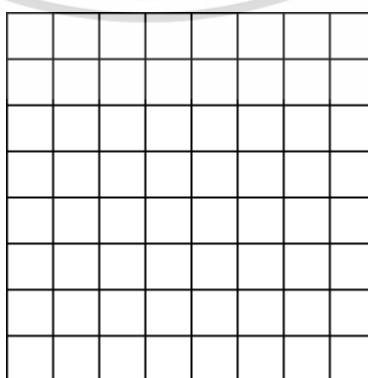
รูปที่ 4.2 แนวคิดของความแม่นยำและความแม่นยำ

วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล แบ่งปัจจัยของความแม่นยำได้เป็น 3 ปัจจัยดังนี้

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

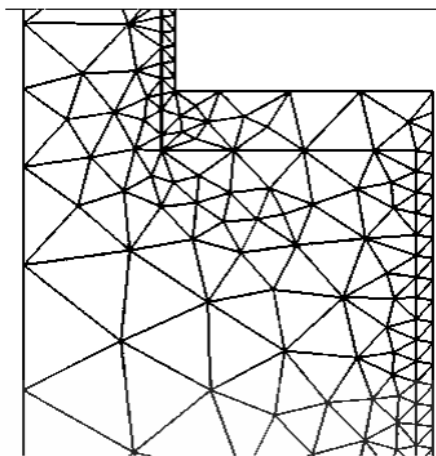
#### 4.5 รูปแบบการจัดวางกริด

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

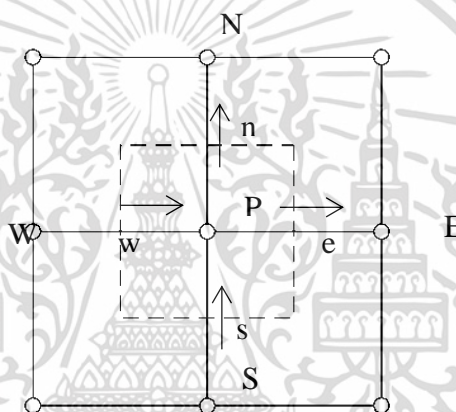


รูปที่ 4.3 การจัดวางกริดแบบโครงสร้างปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การจัดวางกริดแบบไม่เป็นโครงสร้าง



รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ

จากรูปที่ 4.5 ตำแหน่ง P คือตำแหน่งโนด (Node) ที่สนใจ ตัวอักษรพิมพ์เล็กเช่น w, e แสดงถึงตำแหน่งของปริมาณที่เข้า-ออกจากปริมาตรควบคุม (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 การ discretize สมการอนุรักษ์พลังงาน

การ discretize สมการอนุรักษ์พลังงาน โดยไม่พิจารณาเทอมที่เหือดหาย สามารถเขียนได้ดังนี้

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

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

### 4.6.1 การ discretize เทอมไม่คงตัว

แนวทางการ discretize เทอมนี้จะใช้ทฤษฎีของเกาส์ เพื่อพิจารณา (กรณีนี้คืออนุกรม) ที่ส่งถ่ายเข้า-ออกจากขอบเขตของปริมาตรควบคุมเล็กๆ 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 แบบแผนวิธีเอกซ์พลีซิที (Explicit scheme) แบบแผนวิธีอิมพลีซิที (Implicit scheme) และแบบบอผนวิธีแครง-นิโคลสัน (Crank-Nicolson scheme) งานวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะแบบแผนวิธีอิมพลีซิทีซึ่งแบ่งได้หลายอันดับโดยสมการ (4.3) แสดงแบบแผนวิธีอิมพลีซิทีอันดับหนึ่ง (First order implicit scheme) และสมการ (4.4) แสดงแบบแผนวิธีอิมพลีซิทีอันดับสอง (Second order implicit scheme)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $n$  แทนเวลาชั่วขณะที่พิจารณา ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแสดงเฉพาะการดิสเครทไทต์ด้วยแบบแผนวิธีอิมพลีซีที่อันดับหนึ่ง โดยนำสมการ (4.3) แทนในสมการ (4.2) (กรณี 2 มิติและจัดวางกริดตามรูปที่ 4.5) พิจารณาใน 2 มิติ ปริมาตรเซลล์เปลี่ยนเป็นพื้นที่เซลล์ จะได้ว่า

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

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

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 การดิสเครทไทต์การพา

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

$$\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt = \int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho c_p \bar{u}_i T dA \right) dt$$

$$= \rho c_p \left( (uTL)_e - (uTL)_w + (uTL)_n - (uTL)_s \right) \Delta t$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt = (F_e T_e - F_w T_w + F_n T_n - F_s T_s) \Delta t \quad (4.6)$$

ค่าอุณหภูมิที่ผิวเซลล์ เช่น  $T_e$  คืออุณหภูมิที่ผิวเซลล์  $e$  (ของปริมาตรที่โนด  $P$ ) เป็นต้น คือตัวแปรไม่ทราบค่าที่ต้องการประมาณค่า ใช้แบบแผนวิธีครอดราติกและจัดรูปสมการ (4.6) ใหม่จะได้สมการ (4.7) ดังนั้นผลเฉลยที่ได้จึงมีคุณสมบัติของแบบแผนครอดราติก ซึ่งถูกบรรจุอยู่ในพฤติกรรม การไหลที่ส่งผลมาจากเทอมการพา ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้ว่า การเลือกแบบแผนวิธีการคำนวณในแต่ละเทอมมีความสำคัญมากต่อผลเฉลยประมาณค่าของระบบที่พิจารณา

$$\int_t^{t+\Delta t} \left( \int \rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV \right) dt = \left[ \begin{array}{l} \frac{3}{8} T_P \left( (1 + \alpha_e) F_e - (2 - \alpha_w) F_w \right) \\ + (1 + \alpha_n) F_n - (2 - \alpha_s) F_s \\ - \frac{1}{8} T_W \left( \begin{array}{l} 3(1 + \alpha_w) F_w \\ + \alpha_e F_e \end{array} \right) \\ + \frac{1}{8} T_E \left( \begin{array}{l} 3(2 - \alpha_e) F_e \\ + (1 - \alpha_w) F_w \end{array} \right) \\ - \frac{1}{8} T_S \left( \begin{array}{l} 3(1 + \alpha_s) F_s \\ + \alpha_n F_n \end{array} \right) \\ + \frac{1}{8} T_N \left( \begin{array}{l} 3(2 - \alpha_n) F_n \\ + (1 - \alpha_s) F_s \end{array} \right) \\ + \frac{1}{8} T_{WW} (\alpha_w F_w) \\ - \frac{1}{8} T_{EE} ((1 - \alpha_e) F_e) \\ + \frac{1}{8} T_{SS} (\alpha_s F_s) \\ - \frac{1}{8} T_{NN} ((1 - \alpha_n) F_n) \end{array} \right] \Delta t \quad (4.7)$$

#### 4.6.3 การดิสcretไทต์เทอมการแพร่

การดิสcretไทต์ด้วยทฤษฎีของแก๊ส (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + a_{EE} T_{EE} + a_{WW} T_{WW} \quad (4.11)$$

$$+ a_{NN} T_{NN} + a_{SS} T_{SS} + a_p^0 T_p^0$$

$$\text{เมื่อ } a_E = D_e - \frac{3}{8}(2 - \alpha_e)F_e - \frac{1}{8}(1 - \alpha_w)F_w$$

$$a_W = D_w + \frac{3}{8}(1 + \alpha_w)F_w + \frac{1}{8}\alpha_e F_e$$

$$a_N = D_n - \frac{3}{8}(2 - \alpha_n)F_n - \frac{1}{8}(1 - \alpha_s)F_s$$

$$a_S = D_s + \frac{3}{8}(1 + \alpha_s)F_s + \frac{1}{8}\alpha_n F_n$$

$$a_{EE} = \frac{1}{8}(1 - \alpha_e)F_e$$

$$a_{WW} = -\frac{1}{8}\alpha_w F_w$$

$$a_{NN} = \frac{1}{8}(1 - \alpha_n)F_n$$

$$a_{SS} = -\frac{1}{8}\alpha_s F_s$$

$$a_p^0 = \frac{A_p}{\Delta t}$$

$$a_p = a_p^0 + a_E + a_W + a_S + a_{EE} + a_{WW} + a_{NN} + a_{SS} \\ + (F_e - F_w + F_n - F_s)$$

#### 4.7 การดิสเครทไทต์สมการนาเวียร์-สโตกส์

การดิสเครทไทต์สมการนาเวียร์-สโตกส์แบบไร้การอัดตัว ได้ผลเฉลยวิคตังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารทสร้งในสเาหรือการเข้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผูญูได้เห็นไปเซบระโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากสมการ (4.12) พบว่าแต่ละเทอมมีความหมายคล้ายกับสมการอนุรักษ์พลังงานในหัวข้อ 4.6 สมการ (4.1) โดยสมการ (4.12) มีเทอมอัตราเปลี่ยนความดันอยู่ด้วย จากหลักการความคล้ายคลึง ทำให้ไม่ต้องกล่าวรายละเอียดการดิสเครทไทต์เทอมไม่คงตัว เทอมการพาและเทอมการแพร่ซ้ำอีก อย่างไรก็ตามได้แสดงผลการดิสเครทไทต์เทอมดังกล่าวไว้ สำหรับหัวข้อนี้ได้เพิ่มเติมเนื้อหาการดิสเครทไทต์เทอมอัตราเปลี่ยนความดันเป็นหลัก

การดิสเครทไทต์เทอมอัตราเปลี่ยนความดันมีลักษณะที่พิเศษกว่าเทอมอื่นเพราะว่าในระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องจะพิจารณาอัตราเปลี่ยนแปลงความดันเป็นเทอมแหล่งกำเนิด (Source term) เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ควบคู่กัน (Couple relation) ระหว่างสมการอนุรักษ์มวลและสมการนาเวียร์-สโตกส์ ด้วยตัวแปรความเร็ว อีกทั้งสมการนาเวียร์-สโตกส์ ยังมีความควบคู่แบบไม่เชิงเส้น (Non-linear couple) รวมอยู่ด้วย เห็นได้จากเทอมการพาเทียบกับเทอมอื่นๆ ดังนั้นหากทราบค่าของความดันที่ถูกต้องแล้ว ผลเฉลยของสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบไร้การอัดตัว (ความเร็ว) ควรจะสอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวลด้วย

เมื่อพิจารณาเทอมอัตราเปลี่ยนความดันเป็นเทอมแหล่งกำเนิด ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ทฤษฎีของเกาส์ในการดิสเครทไทต์ ดังนั้นสามารถเขียนได้ดังสมการ (4.13) ซึ่งวิธีการแบบนี้เป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้คุณสมบัติการเข้ากันได้ลดลง

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

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

(1) การจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วม (Co-located arrangement)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (2) การจัดเรียงกริดแบบทับซ้อน (Staggered arrangement)

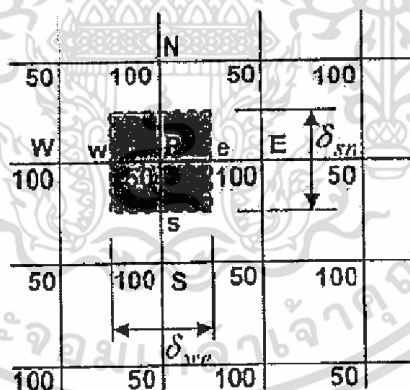
กรณีจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วม การประมาณค่า  $\frac{\partial p}{\partial x_i}$  แบบเชิงเส้นจะได้ดังนี้

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

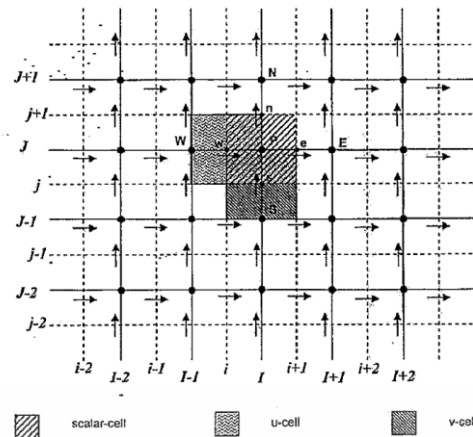
$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_n - p_s}{\delta_{sn}} = \frac{\left(\frac{p_N + p_P}{2}\right) - \left(\frac{p_P + p_S}{2}\right)}{\delta_{sn}} = \frac{p_N - p_S}{2\delta_{sn}}$$

การประมาณอัตราเปลี่ยนแปลงความดันสมการ (4.14) ใช้ได้ดีในปัญหาที่การกระจายตัวของความดันสม่ำเสมอ หากการกระจายตัวของความดันเปลี่ยนแปลงไปมากหรือเกิดพฤติกรรมความดันกระเพื่อม (Pressure fluctuation) ดังในรูปที่ 4.6 เรียกว่า ปัญหากระดานหมากรุก (Checkerboard problem) การประมาณค่าที่มีการจัดเรียงกริดแบบตำแหน่งร่วมจะไม่เหมาะสม

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



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของความดันกระเพื่อมหรือปัญหากระดานหมากรุก



รูปที่ 4.7 การจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนในสองมิติ

ดังนั้นการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อน จึงเป็นเทคนิคที่เกิดขึ้นเพื่อแก้ไขความผิดพลาดของการคำนวณค่าอัตราเปลี่ยนแปลงความดันในปัญหากระดานหมากรุก 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) เพราะพิจารณาอัตราเปลี่ยนแปลงของความดันที่ปริมาตรควบคุมของความเร็ว ในกรณีอัตราเปลี่ยนแปลงความดันตามแนวนอน ( $\partial p / \partial x$ ) ใช้ยูเซลล์และแนวตั้ง ( $\partial p / \partial y$ ) ใช้วีเซลล์ ดังสมการ (4.15) และ (4.16) เป็นการประมาณค่าแบบเชิงเส้น โดยสมการทั้งสองอ้างอิงตำแหน่งแบบคู่อันดับ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\delta_u$  และ  $\delta_v$  คือระยะความกว้างของผิวเซลล์และวีเซลตามลำดับ พิจารณาในปัญหากระดานหมากรุกด้วยสมการ (4.15) และ (4.16) พบว่าค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันมีค่าไม่เป็นศูนย์ แสดงว่าการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนมีแนวโน้มที่ใช้ปริมาณกริดไม่มาก แต่สามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการจัดเรียงกริดแบบทับซ้อนต้องจัดเก็บตำแหน่งยูเซลและวีเซล แยกออกจากตำแหน่งสเกลาร์เซล 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 ไม่สามารถใช้กับกริดรูปแบบอื่นๆได้

เมื่อพิจารณาการดิสcretize ไรต์สมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยใช้หลักการของความคล้ายคลึงจากการดิสcretize ไรต์ของสมการอนุรักษ์พลังงาน สมการ (4.12) โดยจัดรูปใหม่และเขียนได้ดังสมการ (4.18) และ (4.19) ซึ่งเป็นสมการนาเวียร์-สโตกส์ในแนวนอนและแนวตั้งตามลำดับ

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

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

$$\text{เมื่อ } a_E = D_e - \frac{3}{8}(2 - \alpha_e)F_e - \frac{1}{8}(1 - \alpha_w)F_w$$

$$a_W = D_w + \frac{3}{8}(1 + \alpha_w)F_w + \frac{1}{8}\alpha_e F_e$$

$$a_N = D_n - \frac{3}{8}(2 - \alpha_n)F_n - \frac{1}{8}(1 - \alpha_s)F_s$$

$$a_S = D_s + \frac{3}{8}(1 + \alpha_s)F_s + \frac{1}{8}\alpha_n F_n$$

$$a_{EE} = \frac{1}{8}(1 - \alpha_e)F_e$$

$$a_{WW} = -\frac{1}{8}\alpha_w F_w$$

$$a_{NN} = \frac{1}{8}(1 - \alpha_n)F_n$$

$$a_{SS} = -\frac{1}{8}\alpha_s F_s$$

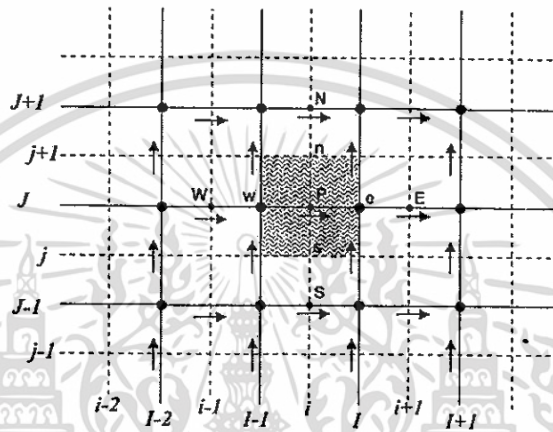
$$a_p^0 = \frac{A_p}{\Delta t}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_p = a_p^0 + a_E + a_W + a_S + a_{EE} + a_{WW} + a_{NN} + a_{SS} \\ + (F_e - F_w + F_n - F_s)$$

สมการ (4.18) และ (4.19) เขียนอยู่ในรูปการจัดวางกริดแบบทับซ้อน ดังนั้นจากหัวข้อที่ผ่านมามีปริมาณ  $F, D$  เขียนอยู่ในรูปแบบของการจัดวางกริดแบบตำแหน่งร่วม จึงต้องปรับปรุง โดยพิจารณากรณีเซลล์และวีเซลล์ตามลำดับดังนี้

(1) สัมประสิทธิ์การพาและการแพร่กรณีเซลล์



รูปที่ 4.8 เวกเตอร์ความเร็วเมื่อพิจารณาเซลล์

จากรูปที่ 4.8 แสดงความเร็วในผนังเซลล์แบบต่างๆของยูเซลล์ในระบบการกำหนดตำแหน่งแบบคู่อันดับ พบว่าตำแหน่งเดิมของโนด P ในรูปที่ 4.7 เป็นตำแหน่งโนด e ในรูปที่ 4.8 เนื่องจากขณะที่พิจารณายูเซลล์ในกริดแบบทับซ้อน ตำแหน่งกึ่งกลางเซลล์เบี่ยงเบนไปทำให้ต้องพิจารณาการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆอีกครั้ง

กรณีความหนาแน่นและความหนืดมีค่าคงที่ สามารถหาสัมประสิทธิ์การพาและการแพร่ได้ดังสมการ (4.20) และ (4.21) ตามลำดับ

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

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

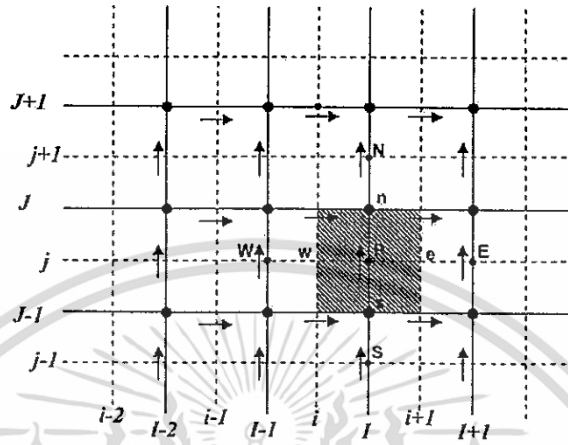
$$D_e = \mu \frac{L_{i,j}}{x_{i+1} - x_i}, \quad D_w = \mu \frac{L_{i-1,j}}{x_i - x_{i-1}}, \quad (4.21)$$

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

(2) สัมประสิทธิ์การพาและการแพร่กรณีวีเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนลิขสิทธิ์ของเนื้อหา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



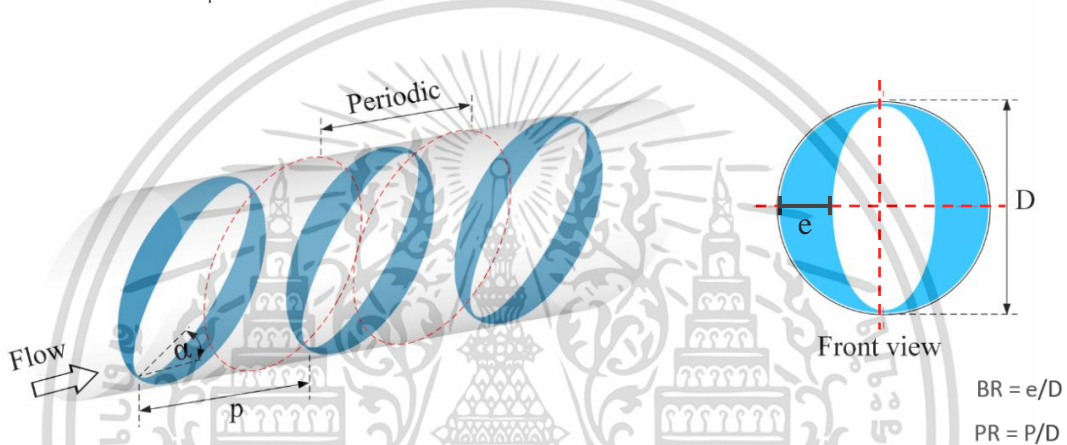
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# การกำหนดปัญหาและการตรวจสอบผลการคำนวณ

### 5.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้สำหรับการวิจัยและพร้อมทั้งทำการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลอง (Experiment result) ซึ่งลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนนี้เป็นท่อกลมที่ใส่วงแหวนเรียงรูปร่างต่างๆภายในท่อดังรูปที่ 5.1 โดยมีอัตราส่วนค่าการบล็อก (Blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 อัตราส่วนค่าพิทช์ (Pitch ratio, PR) เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และมุมปะทะ (Attack angle) เท่ากับ 20, 30 และ 45 องศา



รูปที่ 5.1 ภาพด้านข้างและภาพด้านหน้าแสดงลักษณะของท่อและวงแหวน

### 5.2 สมการควบคุมและสมมติฐาน

การพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม ได้มีสมมติฐานดังต่อไปนี้

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

จากสมมติฐานข้างต้น สำหรับการไหลในท่อกลม สมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน โดยสามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

### 5.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

สำหรับการคำนวณในสามมิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

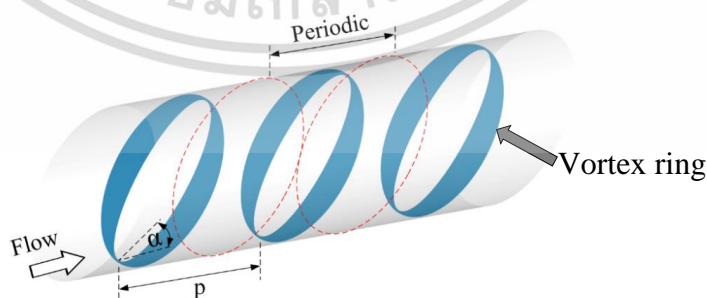
5.3.1 สภาวะทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translation อากาศไหลเข้าด้วยอัตรา การไหลเชิงมวลอย่างสม่ำเสมอและมีค่าเลขพรานด์เทิล (Prandtl number, Pr) คงที่เท่ากับ 0.707

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

5.3.3 กำหนดค่าฟลักซ์ความร้อนมีค่าเท่ากับ 600 วัตต์ต่อตารางเมตร

### 5.4 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลอง

ในการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลการทดลอง ในงานวิจัยนี้ได้นำผลที่ได้จากการจำลองผ่าน โปรแกรมไปเทียบกับผลจากการทดลอง Promvong et al. [5] ซึ่งเป็นการทดลองการไหลของของไหล ผ่านท่อกลมที่ใส่วงแหวนกลมเอียงภายในท่อ โดยการกำหนดเงื่อนไขให้เป็นกรณีเดียวกันกับการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า  $D = 0.05$  m และ สมมติให้ท่อยาวมาก ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นแบบ periodic ที่ทางเข้าและออก ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3 ในกรณีศึกษาต่างๆได้แสดงในตารางที่ 5.1

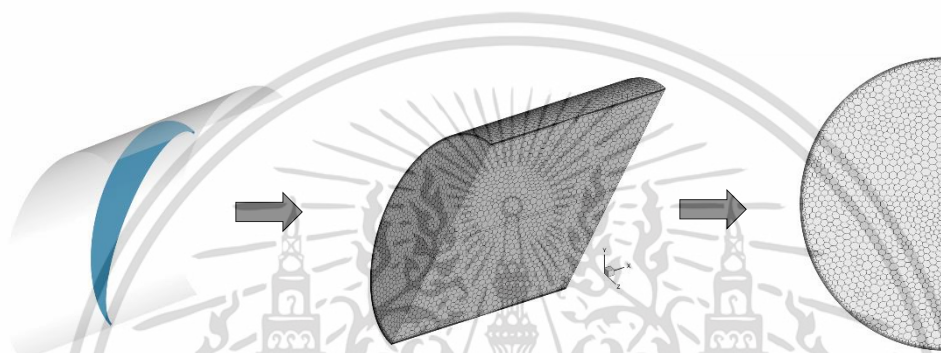


รูปที่ 5.2 แบบจำลองสามมิติของท่อกลมที่มีวงแหวนวอร์เท็กซ์ด้านใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แบบจำลองสามมิติของท่อกลมที่มีวงแหวนวอเท็กซ์ด้านในแบบ 1 โมดูล



รูปที่ 5.4 ลักษณะกริดอิสระที่ใช้ในการจำลองการไหลสามมิติ

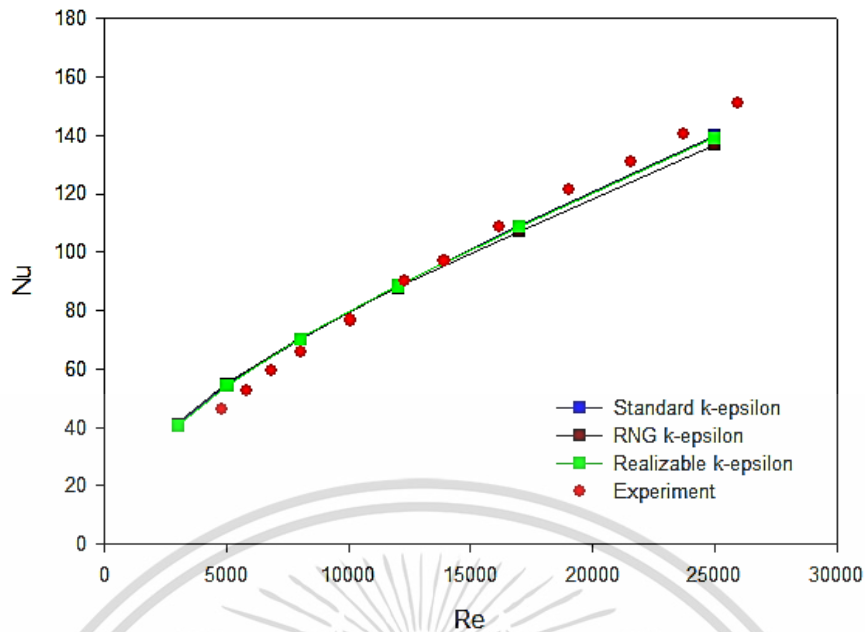
#### 5.4.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริด

กริดที่ใช้สำหรับกรณีใส่งแหวนเอียง ดังแสดงในรูปที่ 5.4 เป็นรูปร่างแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) คือ จะพิจารณาบริเวณที่เป็นวงแหวนให้มีจำนวนกริดหนาแน่นและบริเวณอื่นก็มีจำนวนกริดเบาบางลงทั้งนี้เพื่อประหยัดเวลาและลดภาระของคอมพิวเตอร์ ส่วนการหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบ ได้ทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณของกริดที่แตกต่างกัน ที่ประมาณ 100,000 และ 200,000 ใช้ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE และใช้แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง เงื่อนไขการลู่อเข้า หาคำตอบของทุกค่าอยู่ที่  $10^{-6}$  ยกเว้นสมการพลังงานซึ่งอยู่ที่  $10^{-9}$  พบว่าเมื่อจำนวนกริดเพิ่มขึ้นเป็น 200,000 ค่าเลขชี้เซลล์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1 % ส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1 % เช่นกัน ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของกริดที่ประมาณ 200,000 ซึ่งปริมาณกริดนี้จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆต่อไป

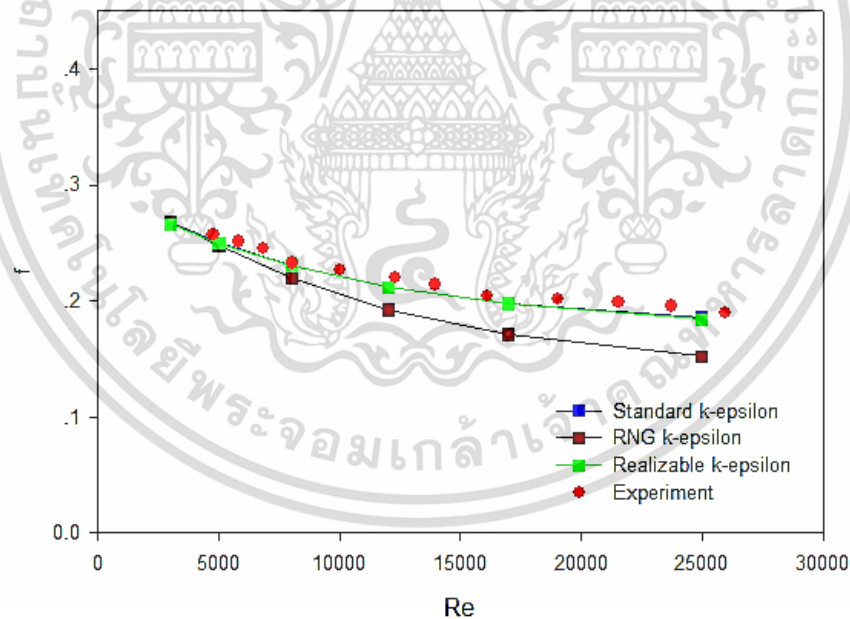
#### 5.4.2 การตรวจสอบแบบจำลองการปั่นป่วน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 กราฟระหว่าง Nu กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับแบบจำลองการปั่นป่วนแต่ละรูปแบบ

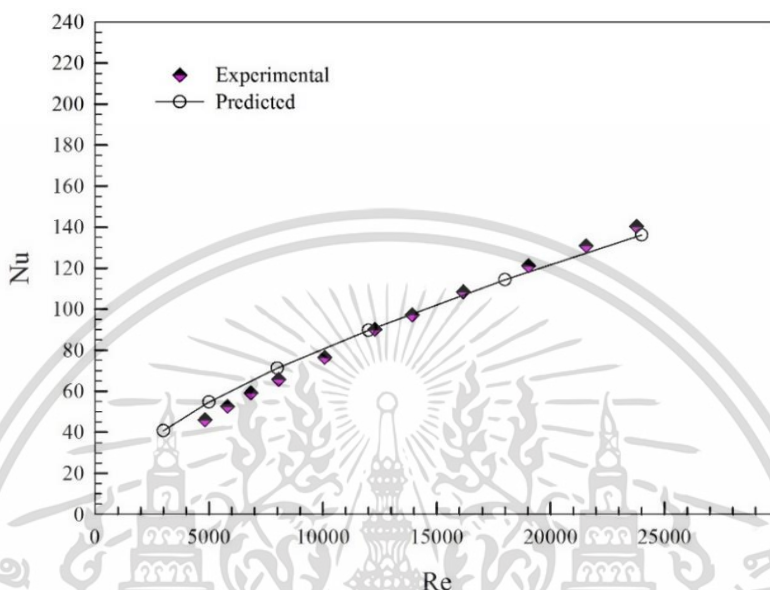


รูปที่ 5.6 กราฟระหว่าง f กับ Re เทียบระหว่างการทดลองกับแบบจำลองการปั่นป่วนแต่ละรูปแบบ

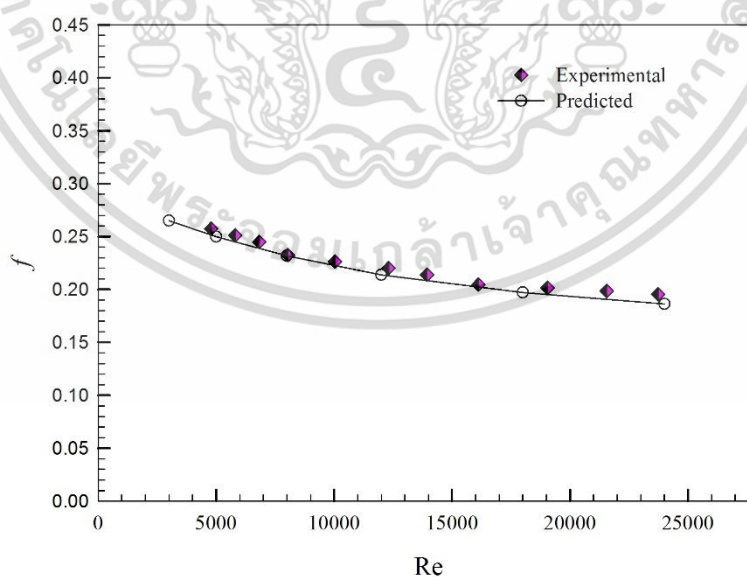
#### 5.4.3 การตรวจสอบระยะห่างระหว่างเส้นรอบวงนอกของวงแหวนกับผิวท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองระยะห่างเส้นรอบวงนอกของวงแหวนกับผิวท่อได้ทำการจำลองที่ระยะห่างเท่ากับ 0.9, 1.0 และ 1.1 มิลลิเมตร พบว่าที่ระยะห่างเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรให้ค่าเลขนซ์เซิลท์และตัวประกอบเสียดทานใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

จากที่ได้ทำการตรวจสอบผลการจำลองจากโปรแกรมกับผลการทดลองตามที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่า ผลลัพธ์จากโปรแกรมนั้นเป็นที่น่าเชื่อถือ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าสามารถนำโปรแกรมไปทำการจำลอง การไหลของของไหลได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดและจากที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยในงานวิจัยนี้สนใจการจำลอง การถ่ายเทความร้อนนี้เป็นท่อกลมที่ติดตั้งวงแหวนเอียงไว้ภายในท่อ ซึ่งมีอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับอัตราส่วนค่าการบล็อก (Blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 และมุมปะทะ (Attack angle) เท่ากับ 20, 30 และ 45 องศาแสดงในตาราง 5.1

ตาราง 5.1 แสดงลักษณะรูปร่างของวงแหวนแต่ละกรณีศึกษา

กรณีศึกษา	รูปร่างของวงแหวน	มุมปะทะ	BR	PR
1	วงแหวนกลม	30	0.05	0.5
2				1.0
3				1.5
4			0.5	
5			1.0	
6			1.5	
7		45	0.10	0.5
8				1.0
9				1.5
10			0.5	
11			1.0	
12			1.5	
13	วงแหวนกลม	45	0.20	0.5
14				1.0
15			1.5	
16			0.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.1 (ต่อ)

กรณี	รูปร่างของวงแหวน	มุมปะทะ	BR	PR		
17	วงแหวนกลม	45	0.15	1.0		
18				1.5		
19			0.20	0.5		
20				1.0		
21				1.5		
22			วงแหวนรี	30	0.05	0.5
23	1.0					
24	0.1	1.5				
25		0.5				
26		1.0				
27	0.15	1.5				
28		0.5				
29		1.0				
30		1.5				
31	วงแหวนรี	45			0.20	0.5
32						1.0
33			1.5			
34			0.10	0.5		
35				1.0		
36				1.5		
37	0.5					
38	1.0					
39	0.15	1.5				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.1 (ต่อ)

กรณีที่	รูปร่างของวงแหวน	มุมปะทะ	BR	PR
40	วงแหวนรี	45	0.20	0.5
41				1.0
42				1.5
43	วงแหวนพีช	30	0.10	0.5
44				1.0
45				1.5
46				0.5
47				1.0
48	วงแหวนพีช	30	0.15	1.5
49				0.5
50				1.0
51				1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย

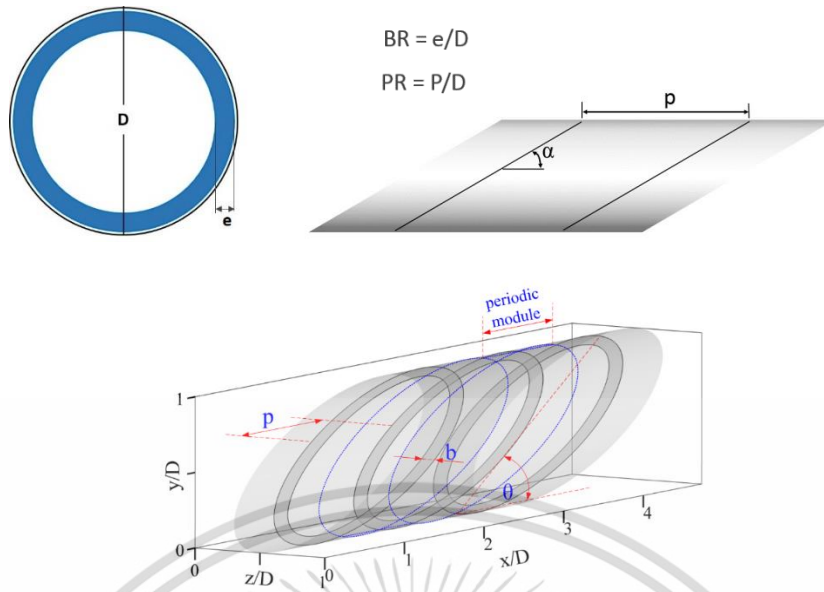
### 6.1 บทนำ

การเพิ่มสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนมักจะตามมาพร้อมกับการสูญเสียความดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสมรรถนะเชิงความร้อนจะสัมพันธ์กับการสูญเสียความดันเนื่องจากความเสียดทานสำหรับของไหลที่มีสถานะความหนาแน่นต่ำ การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมักจะนำไปสู่การสิ้นเปลืองพลังงานทางกล ดังนั้นการออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนสำหรับอัตราการส่วนระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและค่ากำลังทางกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนของไหล

ในบทนี้จะอธิบายผลจากการศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมจากการใส่วงแหวนรูปแบบต่างๆในเงื่อนไขที่แตกต่างกันผ่านการจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลของการถ่ายเทความร้อนจะแสดงในรูปแบบของเลขนซ์เชิลท์และผลของการสูญเสียความดันจะแสดงในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน จากนั้นนำพารามิเตอร์ทั้งสองมาวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีการใส่วงแหวนด้านในและมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ 600 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยการศึกษาจะพิจารณาถึงอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ รูปร่างต่างๆของวงแหวน ประกอบด้วย วงแหวนวงกลม วงแหวนรูปวงรี และวงแหวนรูปวงรีแบบพับ ซึ่งมีมุมปะทะที่ 30 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา ได้ อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยทำการศึกษาการไหลของอากาศที่เลขเรย์โนลด์ 4,000 ถึง 20,000

### 6.2 แหวนวงกลม (Circular Ring)

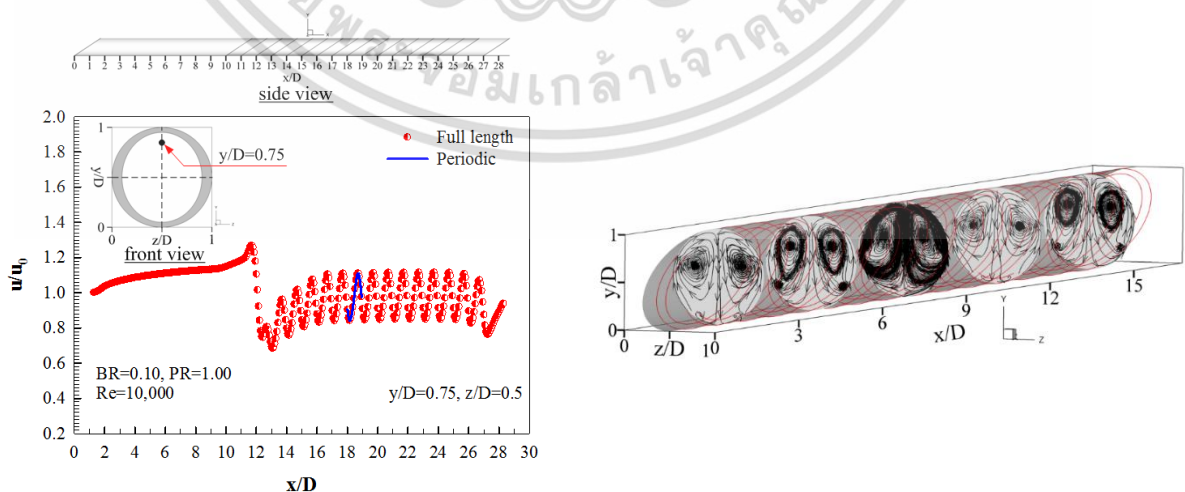
ในส่วนของหัวข้อนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการไหลในท่อกลม โดยจะพิจารณาจากการติดตั้งแหวนวงกลมเอียงทำมุม 30 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา ได้ อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ตามลำดับ



รูปที่ 6.1 ภาพตัดขวาง ภาพสองมิติและภาพสามมิติแสดงลักษณะของท่อที่ติดตั้งแหวนวงกลม

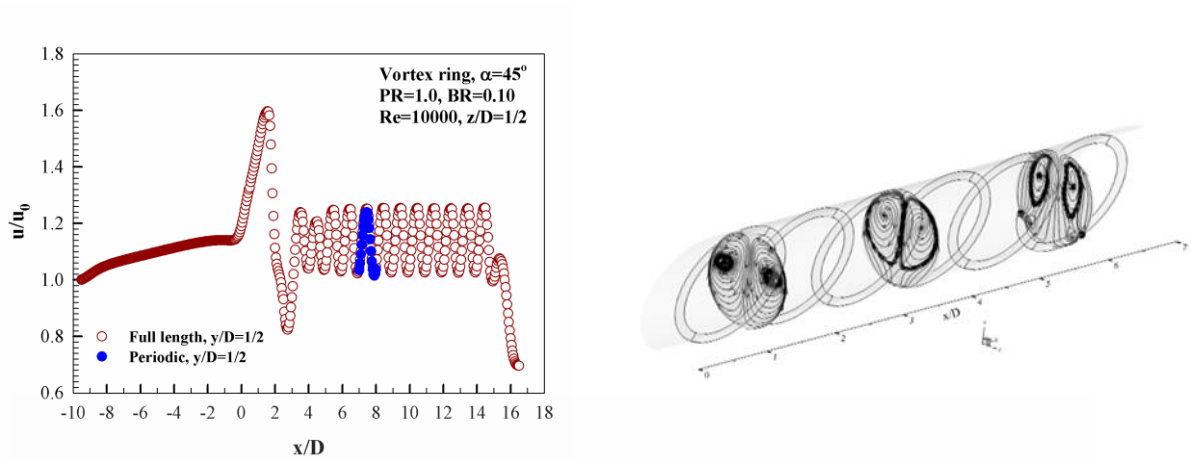
### 6.2.1 โครงสร้างการไหล

จากแผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวาง รูปที่ 6.2 พบว่าภายในท่อเกิดกระแสไหลการไหลวนขึ้นหนึ่งคู่เนื่องจากการติดตั้งวงแหวนกลมเข้าไปในท่อ ซึ่งกระแสไหลวนคู่นี้จะช่วยให้เยื้องนํ้ากระแสการไหลจากบริเวณตรงกลางของท่อไปยังบริเวณผิวท่อ ทำให้เกิดโอกาสแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากขึ้น ส่งผลให้ได้การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่า สังเกตได้จากแผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางดังรูปที่ 6.3 และจากแผนภูมิแสดงเลขนซ์เชิลท์บนผนังท่อรูปที่ 6.4 พบว่า มีการกระจายตัวของอุณหภูมิได้เป็นอย่างดี และในทิศทางเดียวกันจะพบว่าเลขนซ์เชิลท์ที่ได้จากแหวนวงกลมมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่า



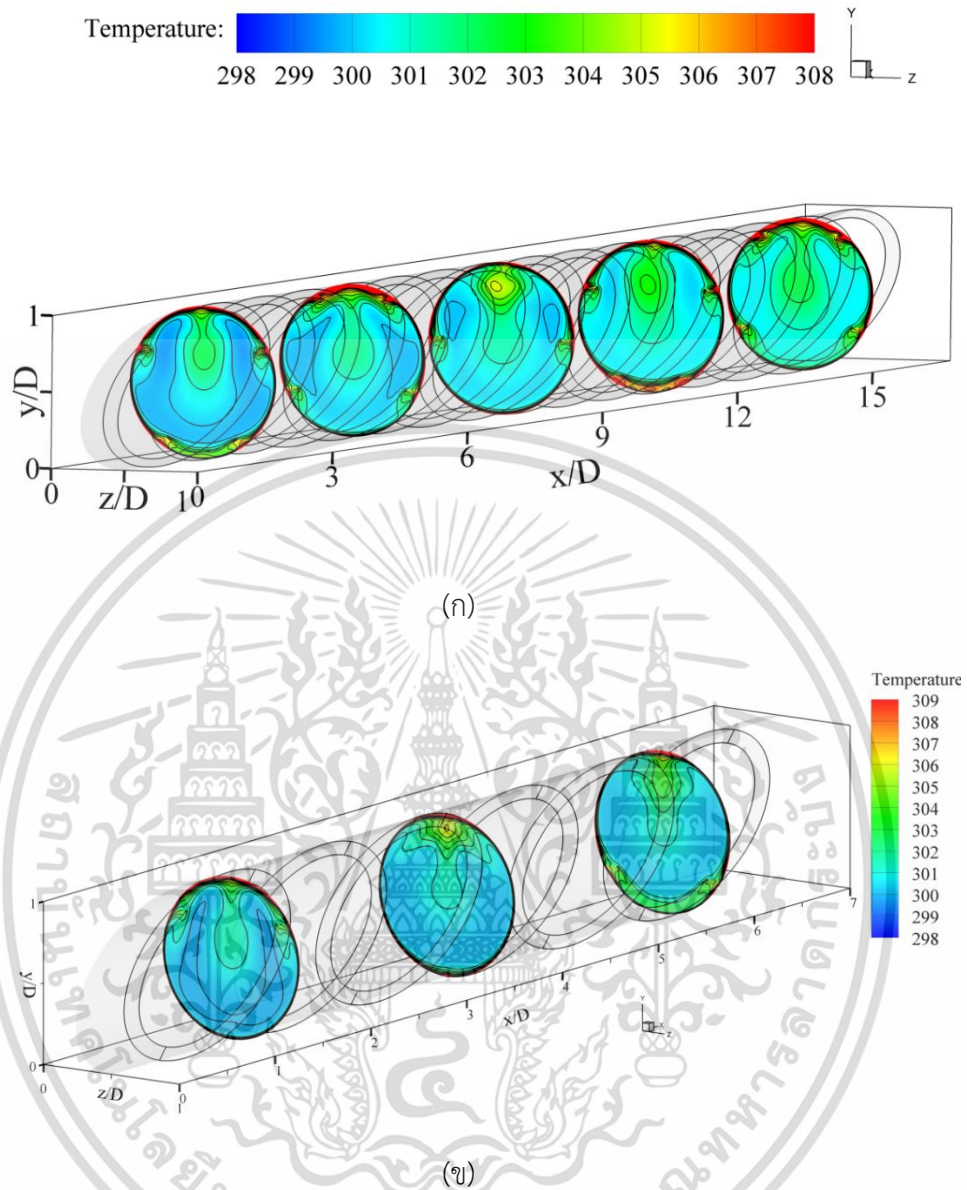
(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



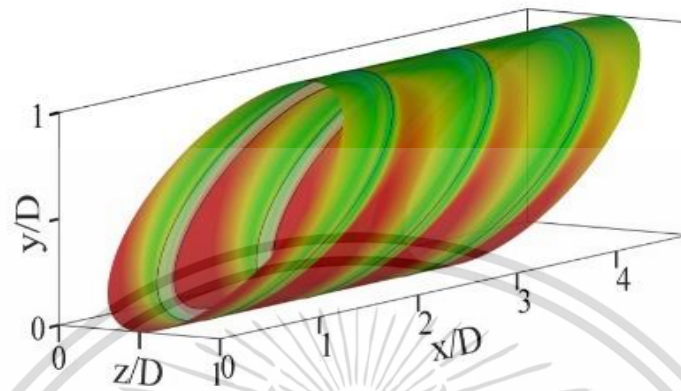
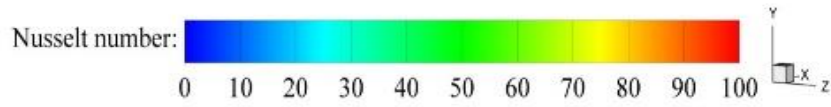
(ข)  
 รูปที่ 6.2 ช่วงการซำและเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวางหลังจากติดตั้งแหวนวงกลมด้านใน BR=0.1, PR=1.0, Re=8000; (ก)  $\alpha = 30^\circ$ , (ข)  $\alpha = 45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

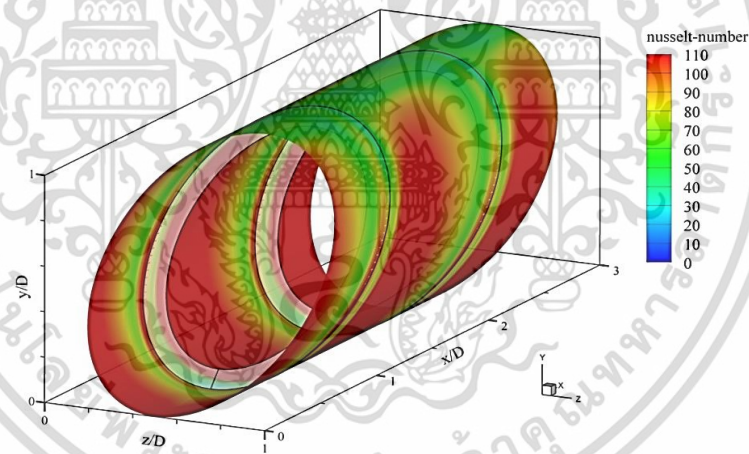


รูปที่ 6.3 อุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางภายในท่อที่มีการติดตั้งแหวนวงกลมด้านใน  $BR=0.1$ ,  $PR=1.0$ ,  $Re=8000$ ; (ก)  $\alpha = 30^\circ$ , (ข)  $\alpha = 45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.4 เลขนซ์เซิลท์บนผนังท่อที่มีการติดตั้งแหวนวงกลมด้านใน  $BR=0.1$ ,  $PR=1.0$ ,  $Re=8000$ ; (ก)  $\alpha = 30^\circ$ , (ข)  $\alpha = 45^\circ$

### 6.2.2 ผลการทดลองเชิงตัวเลข

จากผลที่ได้จากการจำลองการไหล เมื่อกำหนดให้มุมปะทะของวงแหวนมีค่าเท่ากับ 30 และ 45 องศา มีการเปลี่ยนแปลงอัตราค่าส่วนการบดบัง BR และอัตราค่าส่วนพิตซ์ PR เพื่อหารูปแบบของวงแหวนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.5, 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมที่มีแหวนวงกลมใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 30 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงผล จะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เลขนซ์เชิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นและเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดสำหรับมุมปะทะ 30 องศา มีค่าเท่ากับ 227.58 ที่ Re เท่ากับ 20000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5 และเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดสำหรับมุมปะทะ 45 องศา มีค่าเท่ากับ 258.25 ที่ Re เท่ากับ 20000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.7 และ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมที่มีแหวนวงกลมใส่อยู่ด้านในต่อเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะที่ 30 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์มีค่าน้อยลงและอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดสำหรับมุมปะทะ 30 องศา มีค่าเท่ากับ 4.12 ที่ Re เท่ากับ 4000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5 และสำหรับมุมปะทะ 45 องศา อัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 8.14 ที่ Re เท่ากับ 4000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

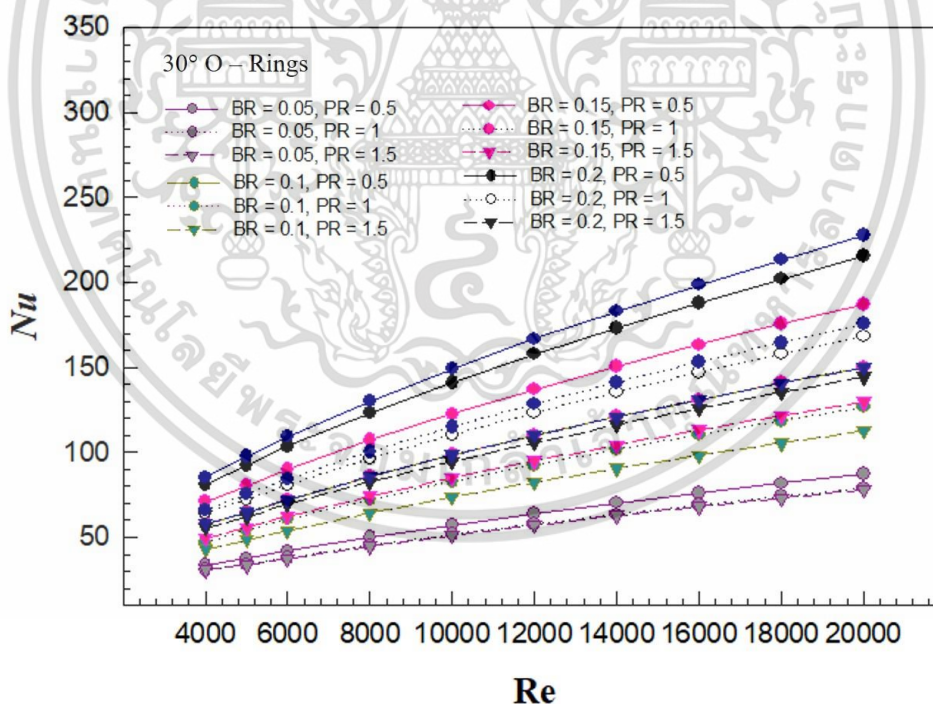
รูปที่ 6.9 และ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีแหวนวงกลมใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะที่ 30 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดสำหรับมุมปะทะ 30 องศา มีค่าประมาณ 1.54 ที่ Re เท่ากับ 4000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5 และสำหรับมุมปะทะ 45 องศา มีค่าประมาณ 3.44 ที่ Re เท่ากับ 4000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.11 และ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีแหวนวงกลมใส่อยู่ด้านในต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะที่ 30 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวจนวเฐสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใชประยชนดานการคา  
ไมวากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

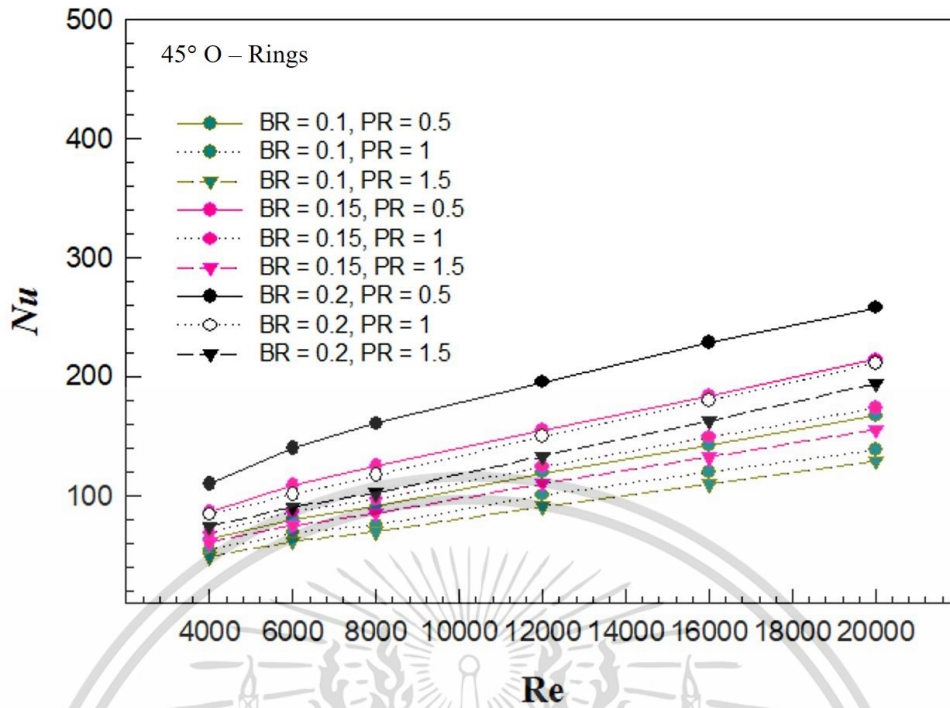
ค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดสำหรับมุมปะทะ 30 องศา มีค่าประมาณ 48.08 ที่ Re เท่ากับ 20000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5 และสำหรับมุมปะทะ 45 องศา มีค่าประมาณ 107.23 ที่ Re เท่ากับ 20000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.13 และ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีแหวนวงกลมใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะที่ 30 องศา อัตราส่วนค่าการบดล็อก (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา อัตราส่วนค่าการบดล็อก (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากที่สุดสำหรับมุมปะทะ 30 องศา มีค่าเท่ากับ 1.91 ที่ Re เท่ากับ 4000, BR เท่ากับ 0.15 และ PR เท่ากับ 0.5 และสำหรับมุมปะทะ 45 องศา มีค่าเท่ากับ 1.8 ที่ Re เท่ากับ 4000, BR เท่ากับ 0.15 และ PR เท่ากับ 0.5

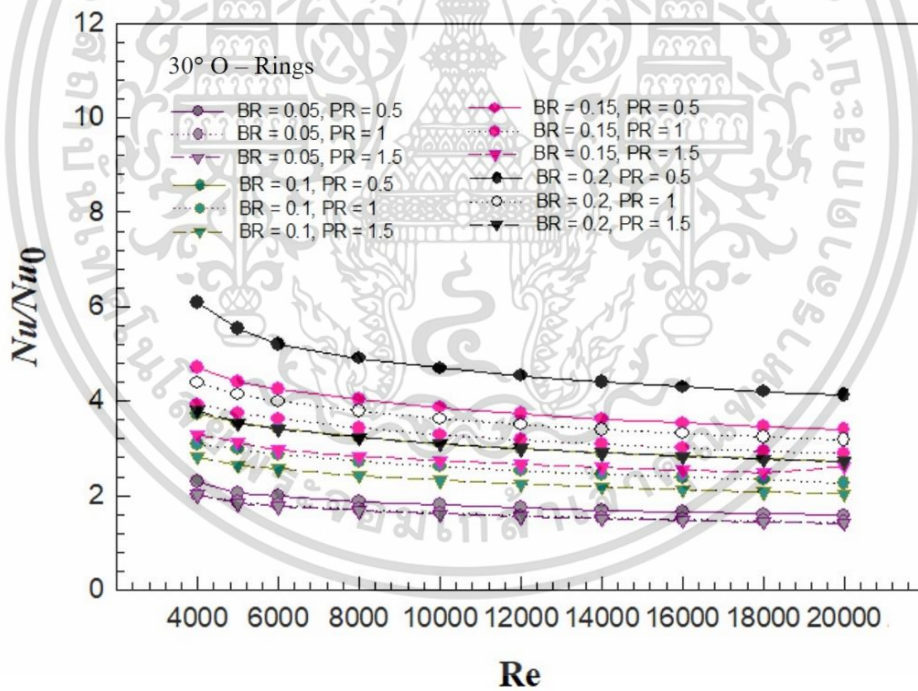


รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชิลท์ ที่  $\alpha = 30^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

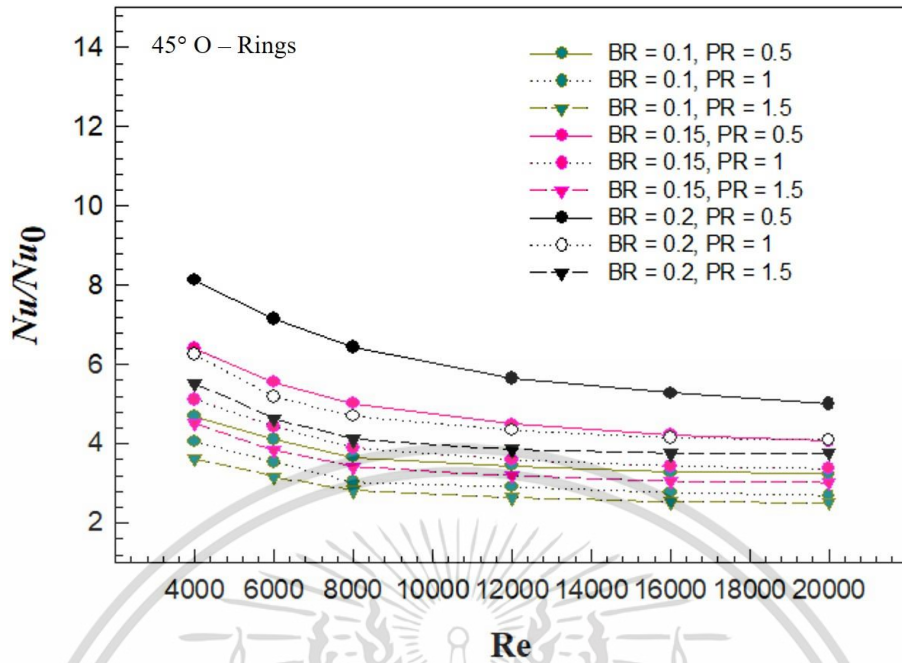


รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เซิลท์ ที่  $\alpha = 45^\circ$

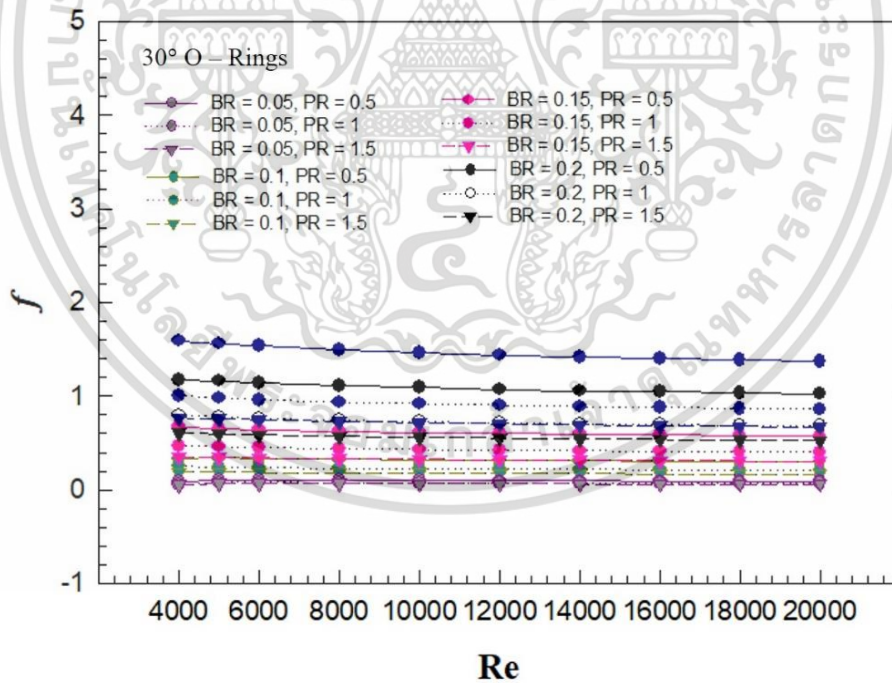


รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เซิลท์ที่  $\alpha = 30^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

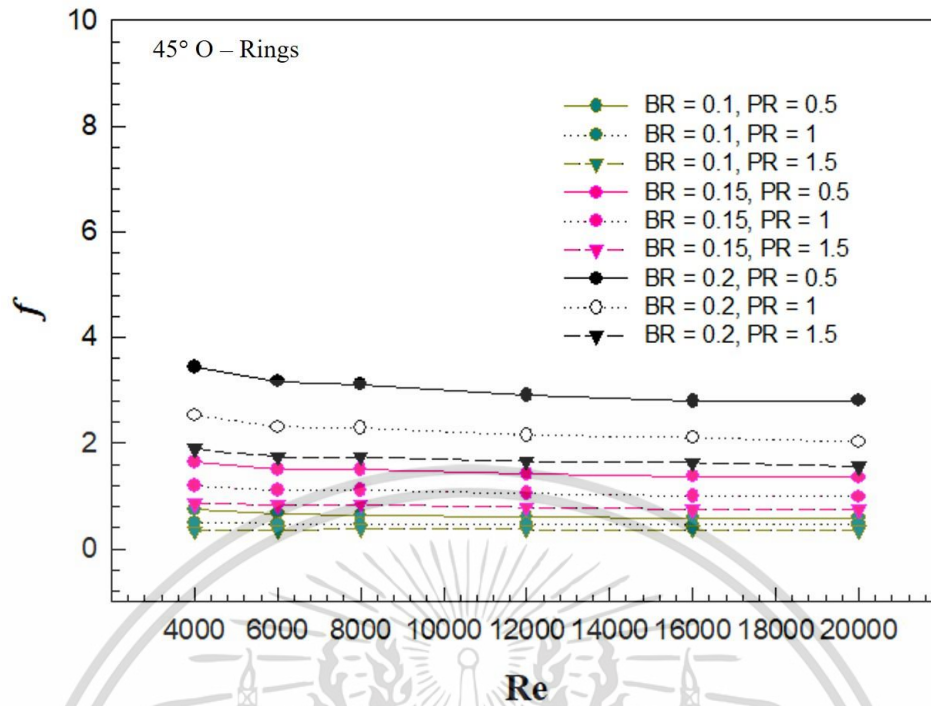


รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เซิลท์ที่  $\alpha = 45^\circ$

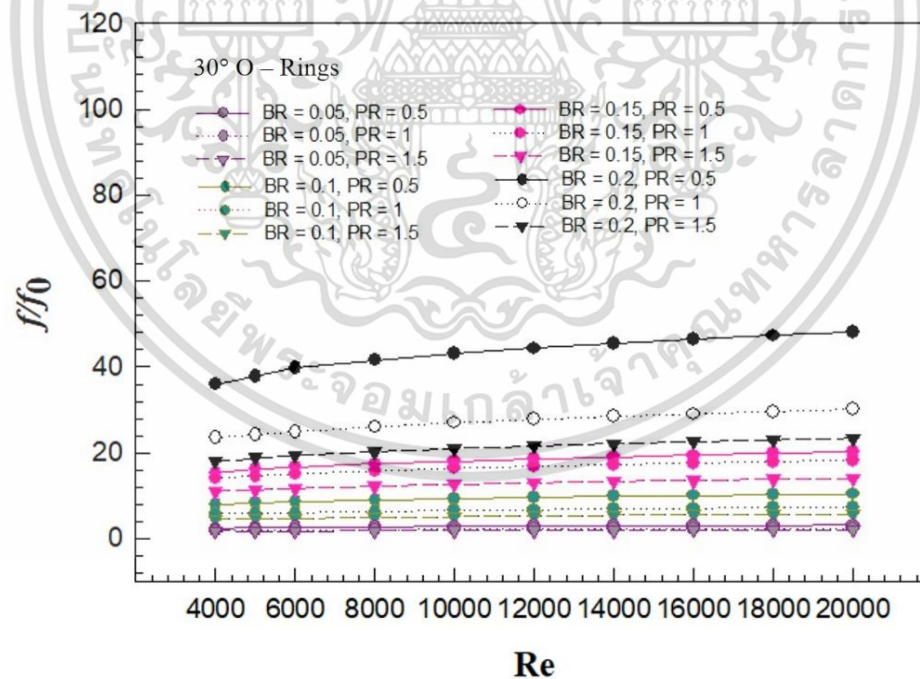


รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน ที่  $\alpha = 30^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

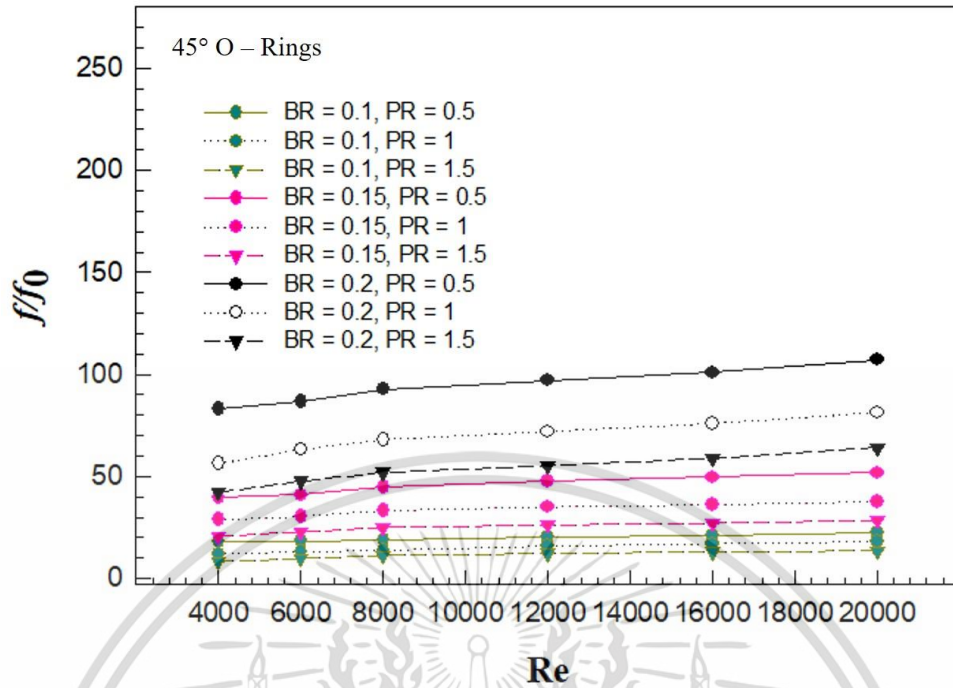


รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน ที่  $\alpha = 45^\circ$

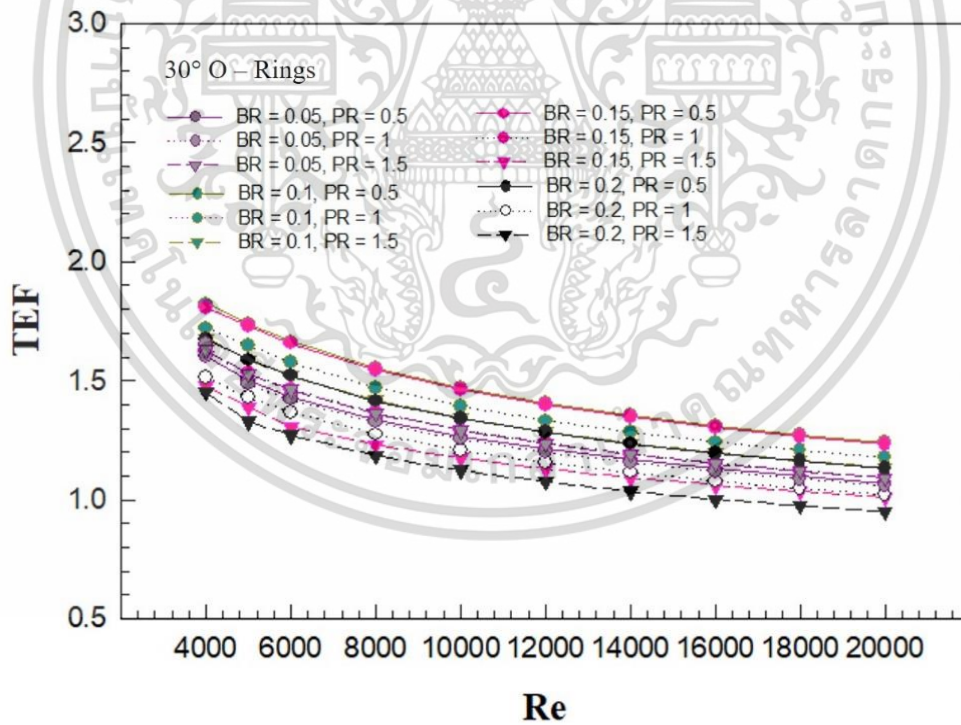


รูปที่ 6.11 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ที่  $\alpha = 30^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

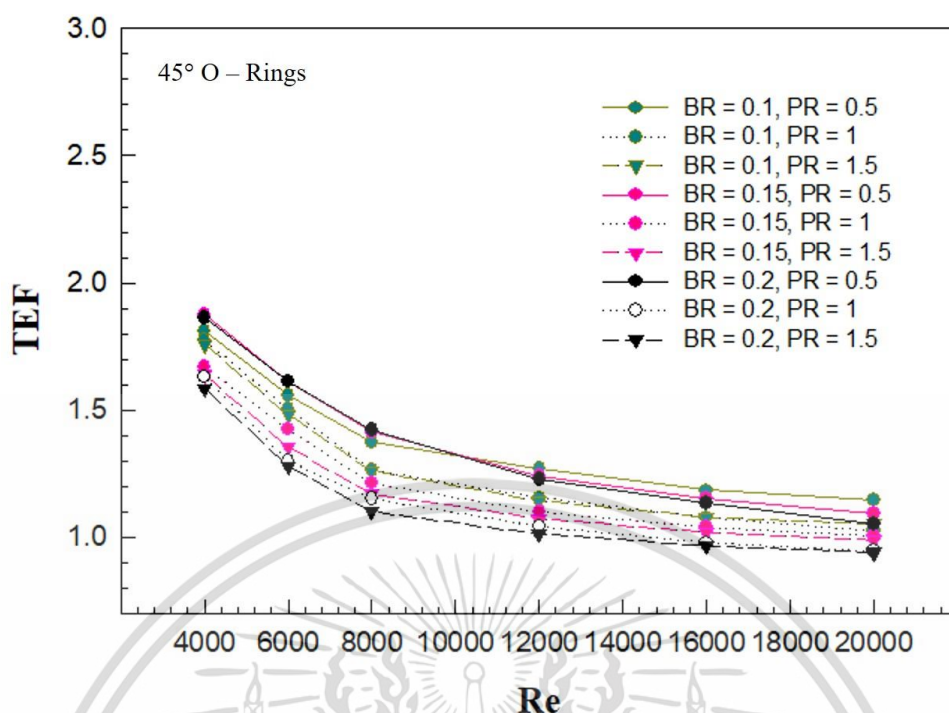


รูปที่ 6.12 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ที่  $\alpha = 45^\circ$



รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนที่  $\alpha = 30^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนที่  $\alpha = 45^\circ$

### 6.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลองเชิงตัวเลข

หลังจากได้ผลจากการทดลองเชิงตัวเลขจากการติดตั้งแหวนวงกลมเข้าไปในท่อ พบว่าการติดตั้งมูม 30 องศา และ 45 องศาให้ผลต่างกันดังตารางที่ 6.1 ดังนี้

ตารางที่ 6.1 แสดงผลจากการติดตั้งแหวนวงกลมแต่ละมูม

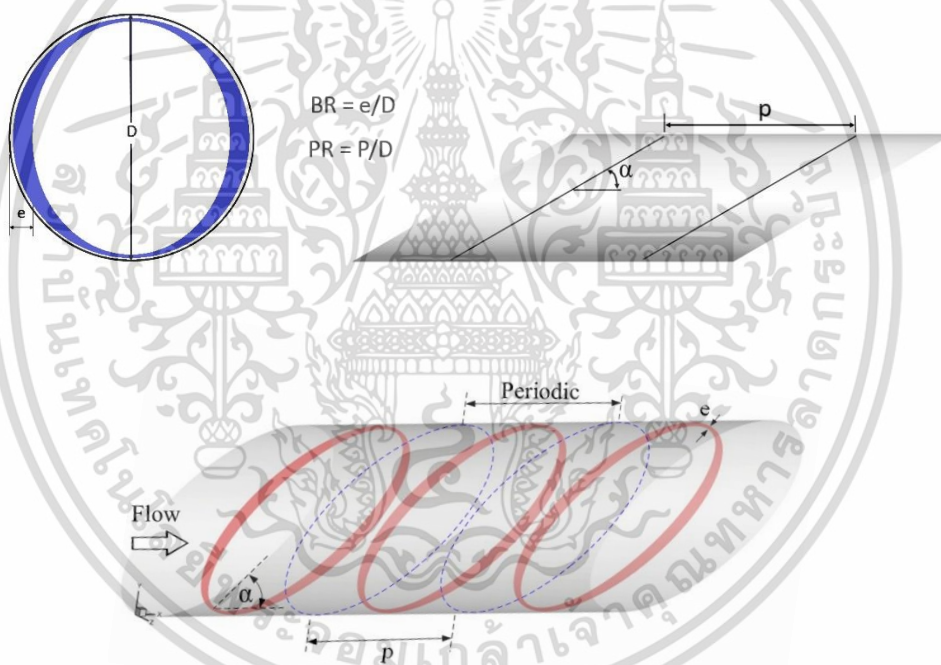
Model	$Nu/Nu_0$	$f/f_0$	TEF
O-ring $30^\circ$	6.18	48.07	1.86
O-ring $45^\circ$	8.14	107.23	1.8

จากตารางที่ 6.1 สามารถวิเคราะห์ผลสำหรับอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์สำหรับมูม 30 องศา และ 45 องศา ได้ว่า ผลจากการติดตั้งแหวนวงกลมลงไปในห้องที่มูม 45 องศา ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์เพิ่มขึ้นถึง 31.71% สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้ว่า ผลจากการติดตั้งแหวนวงกลมลงไปในห้องที่มูม 45 องศาทำให้ได้ค่าสูงขึ้นมาถึง 123.07% แต่ว่าเมื่อพิจารณาผลของสมรรถนะค่าการแลกเปลี่ยนความร้อน จะเห็นได้ว่าผลจากการจากการติดตั้งแหวนวงกลมลงไปในห้องที่มูม 45 องศา นั้น ทำให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนลดลงถึง 3.22% ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานนั้นมากกว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์เป็นอย่างมาก เป็นผลให้การติดตั้งวงแหวนที่มูม 30 องศาให้ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าการติดตั้งวงแหวนที่มูม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 แหวนวงรี (Oval Ring)

หลังจากที่ได้ศึกษาวิเคราะห์จากแหวนวงกลมภายใต้การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขต่างๆ ที่ผ่านมา พบว่าวงแหวนจะได้ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น เมื่อความหนาของวงแหวนบริเวณด้านบนและด้านล่างมีขนาดบางๆ จึงได้ทำการจำลองวงแหวนรูปวงรีขึ้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความเสียหายจากการไหลในท่อกลม โดนบริเวณด้านบนและล่างของวงแหวนนั้นมีความหนาคงที่ ส่วนความหนาด้านข้างเพิ่มลดได้ดังรูปที่ 6.14 ภายใต้เงื่อนไขวงรีเอียงมุม 30 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อกร (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา ได้ อัตราส่วนค่าการบล็อกร (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ตามลำดับ



รูปที่ 6.15 ภาพตัดขวาง ภาพสองมิติและภาพสามมิติแสดงลักษณะของท่อและวงแหวนวงรี

#### 6.3.1 โครงสร้างการไหล

จากแผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวาง รูปที่ 6.15 จะพบว่าภายในท่อจะมีกระแสไหลวนเกินขึ้นสองวง ลักษณะคล้ายกับกระแสเหนี่ยวนำจากการติดตั้งแหวนวงกลม และพบว่ากระแสไหลวนคู่นี้ซึ่งเกิดขึ้นจากการใส่วงแหวนนั้นมี ความรุนแรงของการไหลวนมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแหวนวงกลมเพราะมีการขวางการไหลของของไหลที่น้อยกว่า สังเกตได้จากแผนภูมิแสดงอุณหภูมิของของไหลบนระนาบตัดขวางดังรูปที่ 6.16 พบว่า กระแสที่ไหลวนจะไหลวนได้ดีกว่าแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

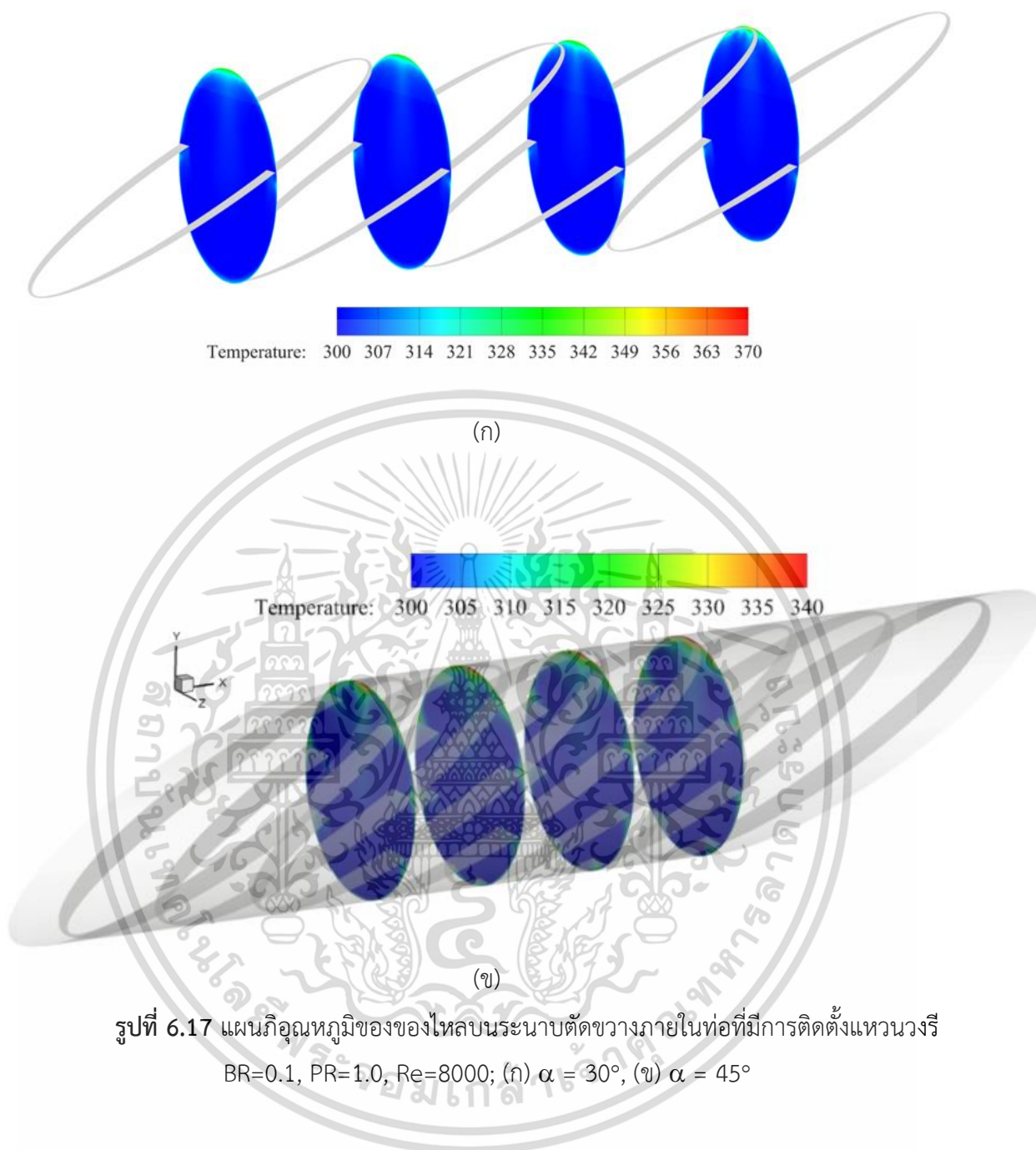
วงกลมทำให้ของไหลจากบริเวณกลางท่อเกิดการไหลหมุนวนไปแลกเปลี่ยนกับความร้อนตรงบริเวณขอบของท่อได้ดีกว่า ซึ่งทำให้ได้อัตรการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าการติดตั้งแหวนวงกลม

จากแผนภูมิแสดงอุณหภูมิบนผนังท่อรูปที่ 6.17 จะพบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการถ่ายเทความร้อนจากการติดตั้งวงแหวนแบบวงรีมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากวงแหวนแบบกลม จึงสรุปได้ว่าการติดตั้งวงแหวนแบบรีลงไปนั้นสามารถทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าการติดตั้งวงแหวนแบบวงกลม ส่งผลให้การติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนทางการไหลโดยใช้วงแหวนแบบรีทำให้เกิดสมรรถนะการแลกเปลี่ยนทางความร้อนที่สูงกว่า

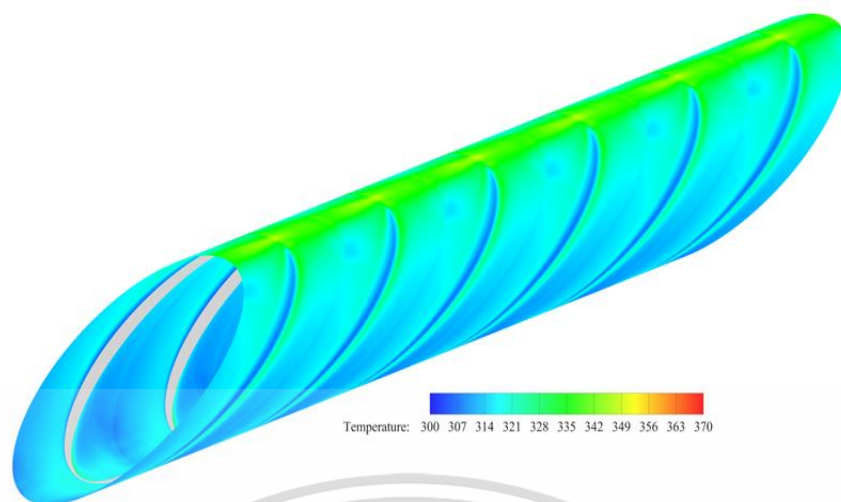


รูปที่ 6.16 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตัดขวางที่มีการใส่แหวนวงรีด้านใน  $BR=0.1$ ,  $PR=1.0$ ,  $Re=8000$ ; (ก)  $\alpha = 30^\circ$ , (ข)  $\alpha = 45^\circ$

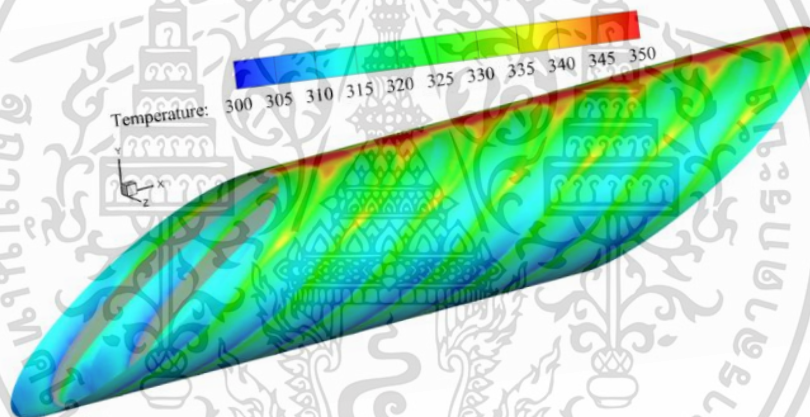
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.18 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิบนผนังท่อที่มีการใส่วงแหวนวงรีด้านใน BR=0.1, PR=1.0, Re=8000; (ก)  $\alpha = 30^\circ$ , (ข)  $\alpha = 45^\circ$

### 6.3.2 ผลการทดลองเชิงตัวเลข

จากผลที่ได้จากการจำลองการไหล เมื่อกำหนดให้มุมปะทะของวงแหวนวงรีมีค่าเท่ากับ 30 องศา และ 45 องศา ได้ อัตราส่วนค่าการบดบัง (Blockage ratio, BR) และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อหารูปแบบของวงแหวนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

รูปที่ 6.18 และ 6.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เซลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนวงรีใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะ 30 องศา อัตราส่วนค่าการบดบัง (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา ได้ อัตราส่วนค่าการบดบัง (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เลขนซ์เชิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นและเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดสำหรับมุม 30 องศา มีค่าอยู่ที่อยู่ที่ประมาณ 178.89 ที่ Re เท่ากับ 20000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5 และสำหรับมุม 45 องศา มีค่าอยู่ที่ที่มีค่าเท่ากับ 267.54 ที่ Re เท่ากับ 20000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.20 และ 6.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมที่มีวงแหวนวงรีใส่อยู่ด้านในต่อเลขนซ์เชิลท์ของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะที่ 30 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา ได้ อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์มีค่าน้อยลงและอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ BR มีค่าเพิ่มขึ้นและ PR มีค่าลดลง โดยค่าอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์ที่มากที่สุดสำหรับมุม 30 องศาอยู่ที่ 3.46 ที่ Re เท่ากับ 4000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5 และสำหรับมุม 45 องศาอยู่ที่ 5.18 ที่ Re เท่ากับ 4000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

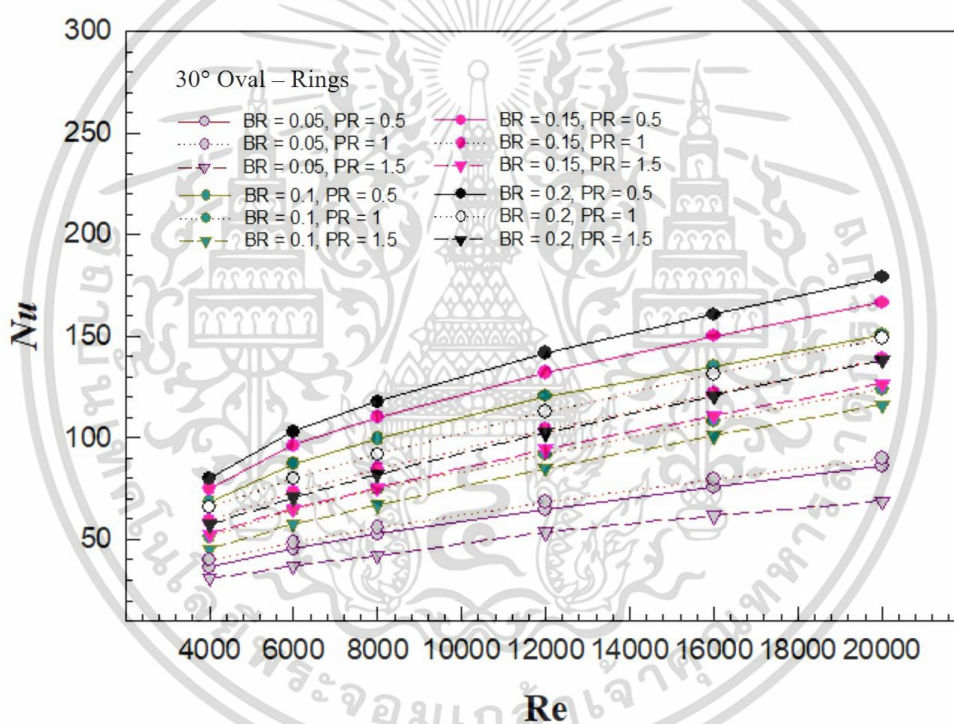
รูปที่ 6.22 และ 6.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงรีใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะที่ 30 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา ได้ อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดมีสำหรับมุม 30 องศาอยู่ที่ประมาณ 0.68 ที่ Re เท่ากับ 4000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5 และสำหรับมุม 45 องศาอยู่ที่ประมาณ 3.42 ที่ Re เท่ากับ 4000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.24 และ 6.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่มีวงรีเหลี่ยมใส่อยู่ด้านในต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ โดยวงแหวนมีมุมปะทะที่ 30 องศา อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา ได้ อัตราส่วนค่าการบล็อค (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อ BR มีค่าลดลงและ PR มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากที่สุดสำหรับมุม 30 องศา มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

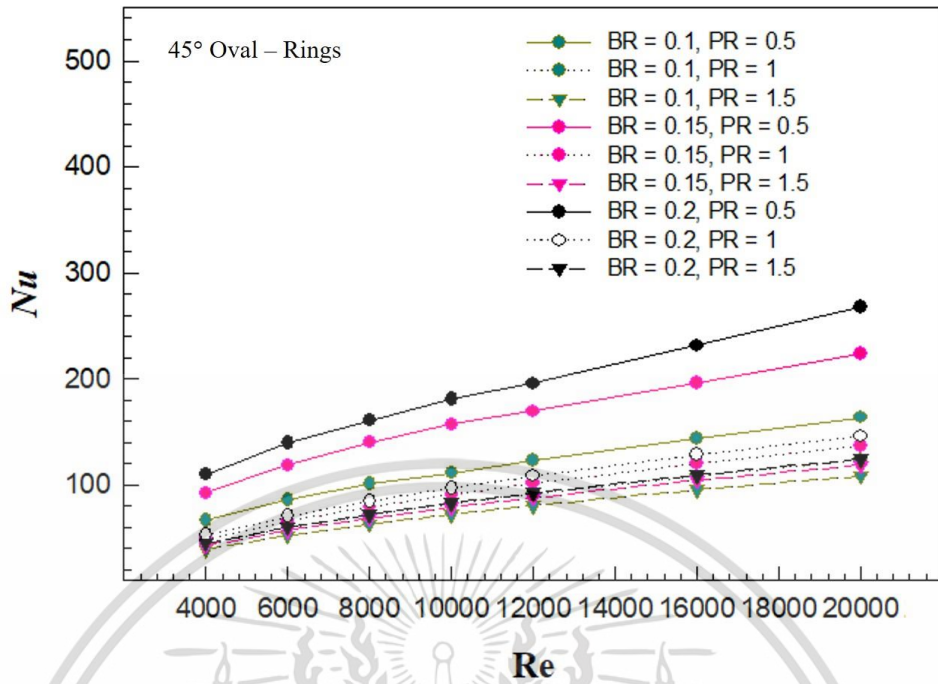
ค่าอยู่ที่อยู่ประมาณ 17.61 ที่ Re เท่ากับ 20000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5 และสำหรับมุม 45 องศา มีค่าอยู่ประมาณ 103.45 ที่ Re เท่ากับ 20000, BR เท่ากับ 0.2 และ PR เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.26 และ 6.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีวงรีใส่อยู่ด้านใน โดยวงแหวนมีมุมปะทะที่ 30 องศา อัตราส่วนค่าการบดบัง (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 และสำหรับมุม 45 องศา ได้ อัตราส่วนค่าการบดบัง (Blockage ratio, BR) มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์ (Pitch ratio, PR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากที่สุดมีสำหรับมุม 30 องศา มีค่าอยู่ประมาณ 2.46 ที่ Re เท่ากับ 4000, BR เท่ากับ 0.1 และ PR เท่ากับ 0.5 และสำหรับมุม 45 องศา มีค่าอยู่ประมาณ ค่าเท่ากับ 1.99 ที่ Re เท่ากับ 4000, BR เท่ากับ 0.15 และ PR เท่ากับ 0.5

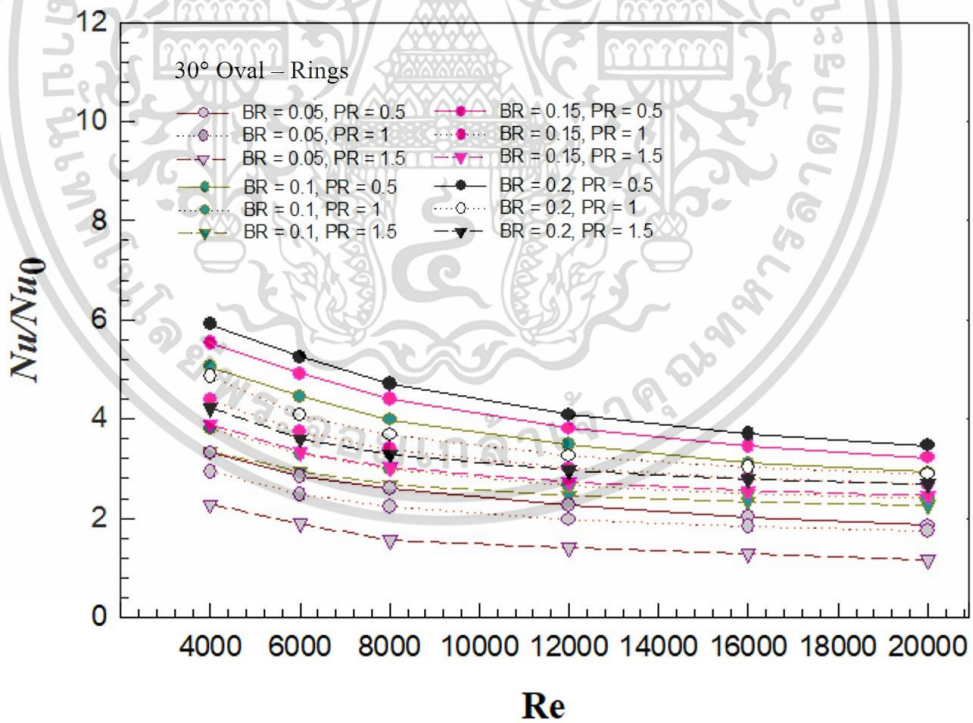


รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เซิลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

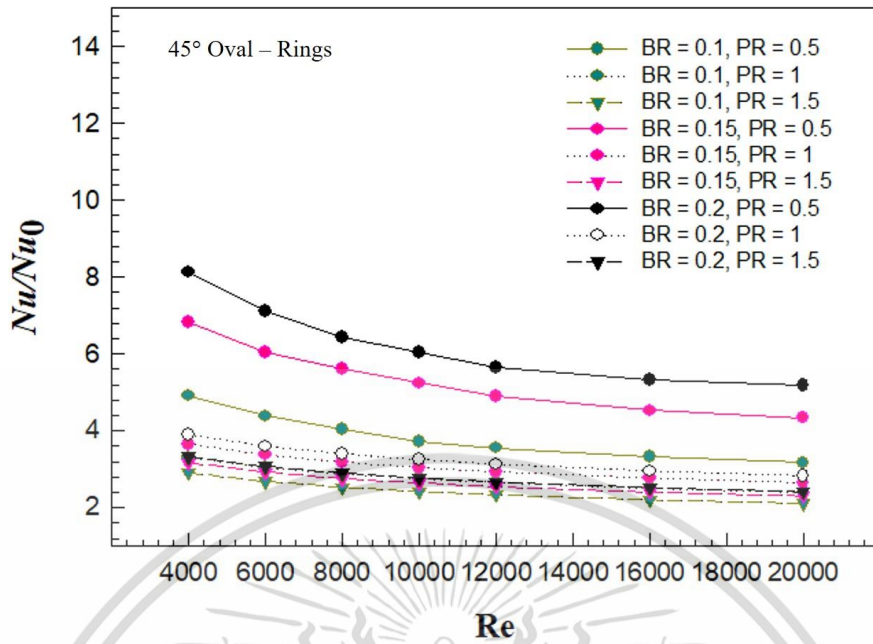


รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขนซ์เชิลท์

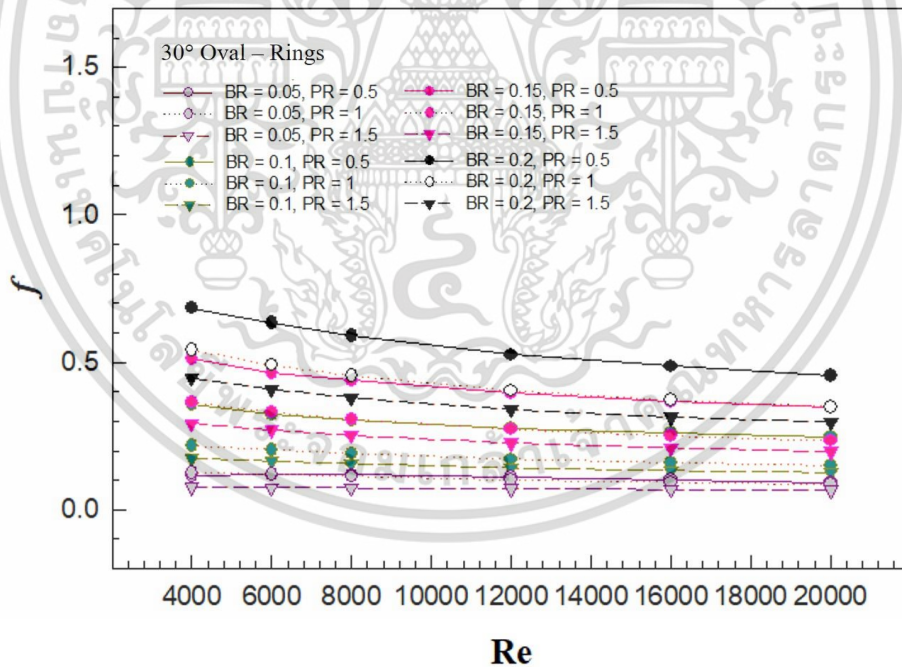


รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

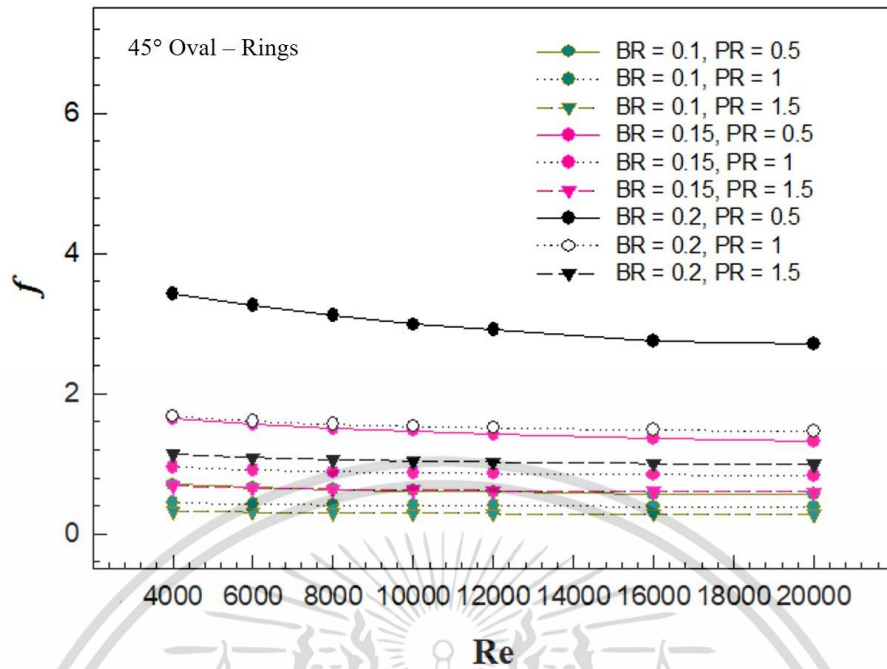


รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนเลขนซ์เซิลท์

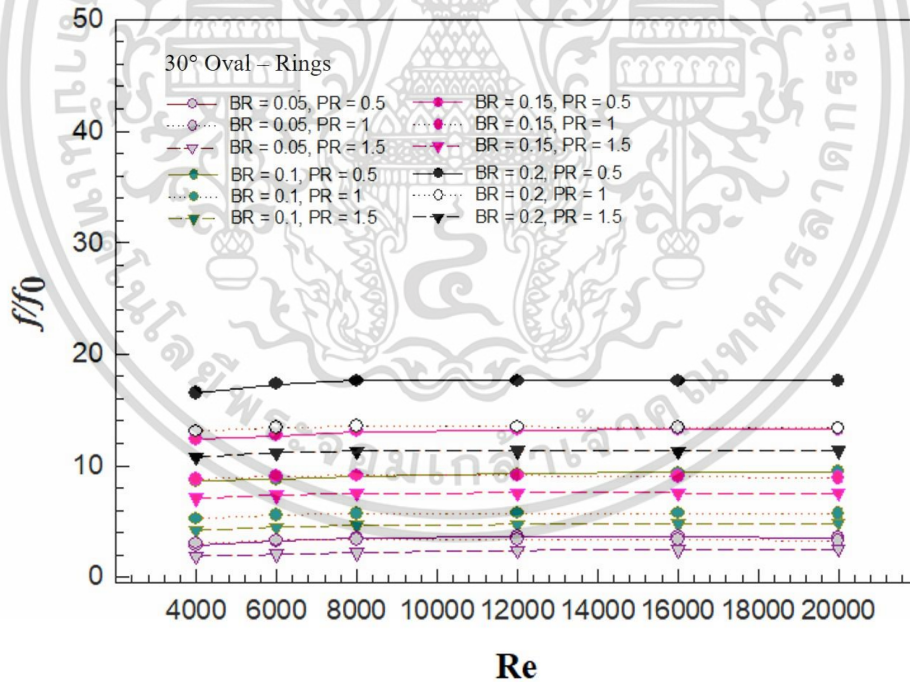


รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

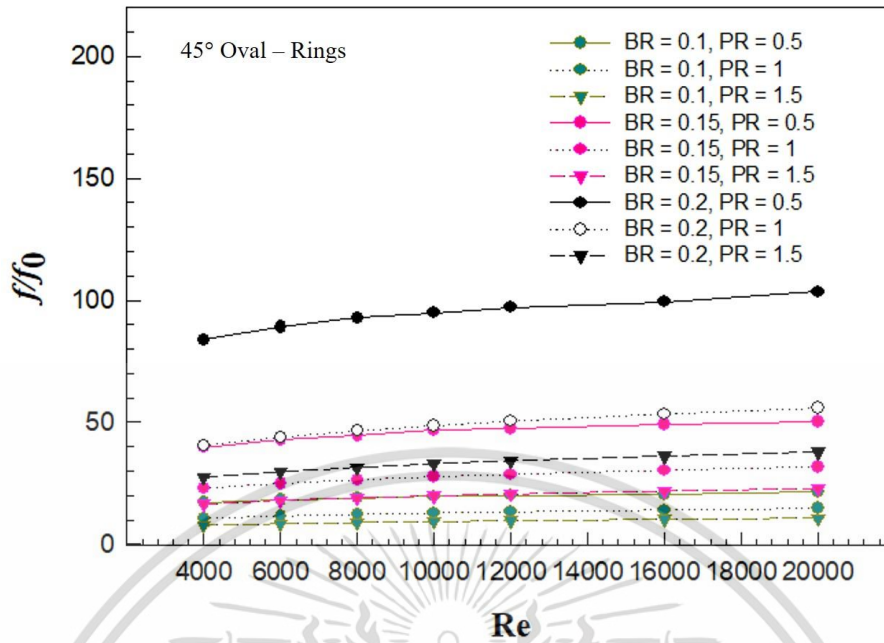


รูปที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน

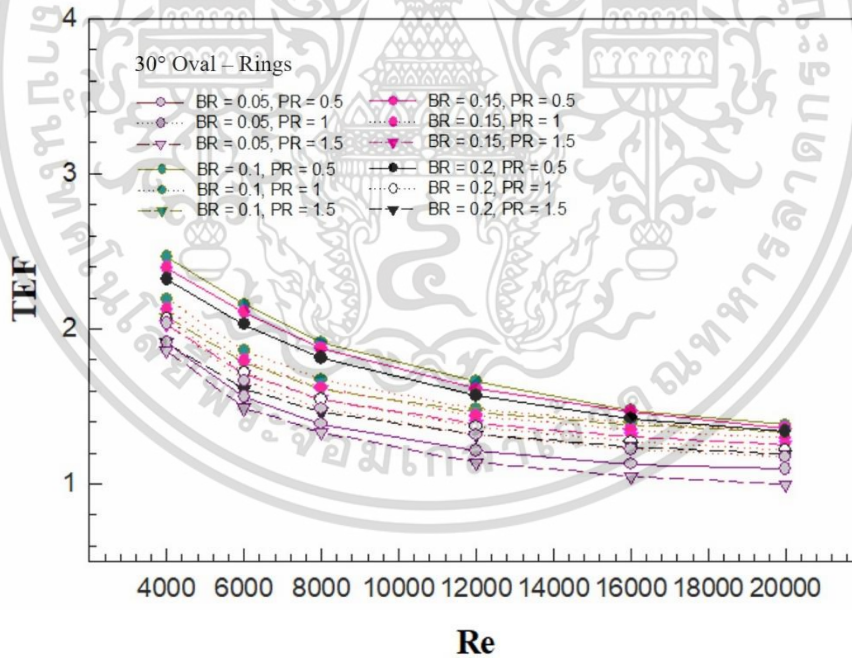


รูปที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

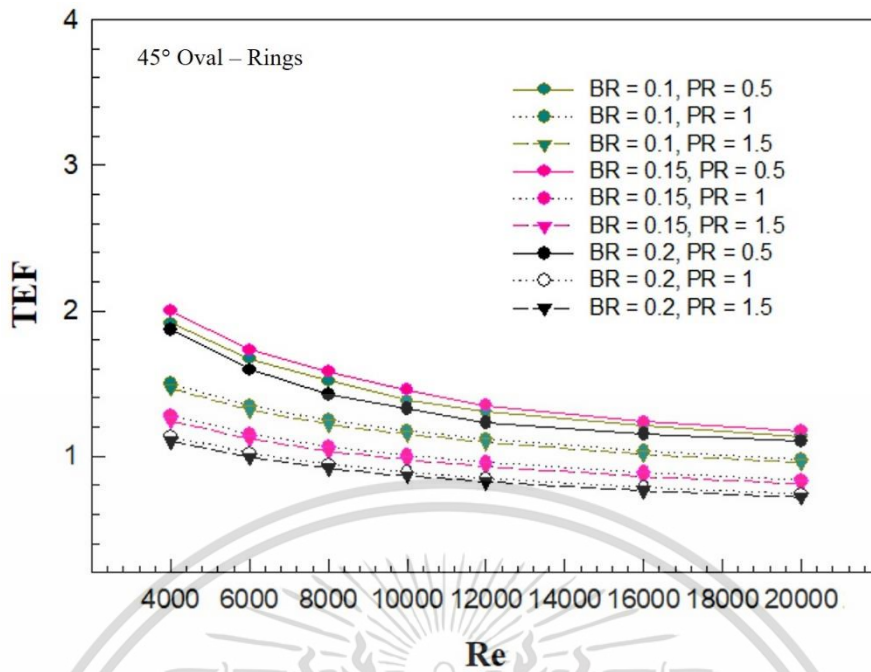


รูปที่ 6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน



รูปที่ 6.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.28 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และสมรรถนะเชิงความร้อน

### 6.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลองเชิงตัวเลข

หลังจากได้ผลจากการทดลองเชิงตัวเลขจากการติดตั้งแหวนวงรีเข้าไปในท่อ พบว่าที่การติดตั้งมุม 30 องศา และ 45 องศาให้ผลต่างกันดังตารางที่ 6.1 ดังนี้

ตารางที่ 6.2 แสดงผลจากการติดตั้งแหวนวงรีแต่ละมุม

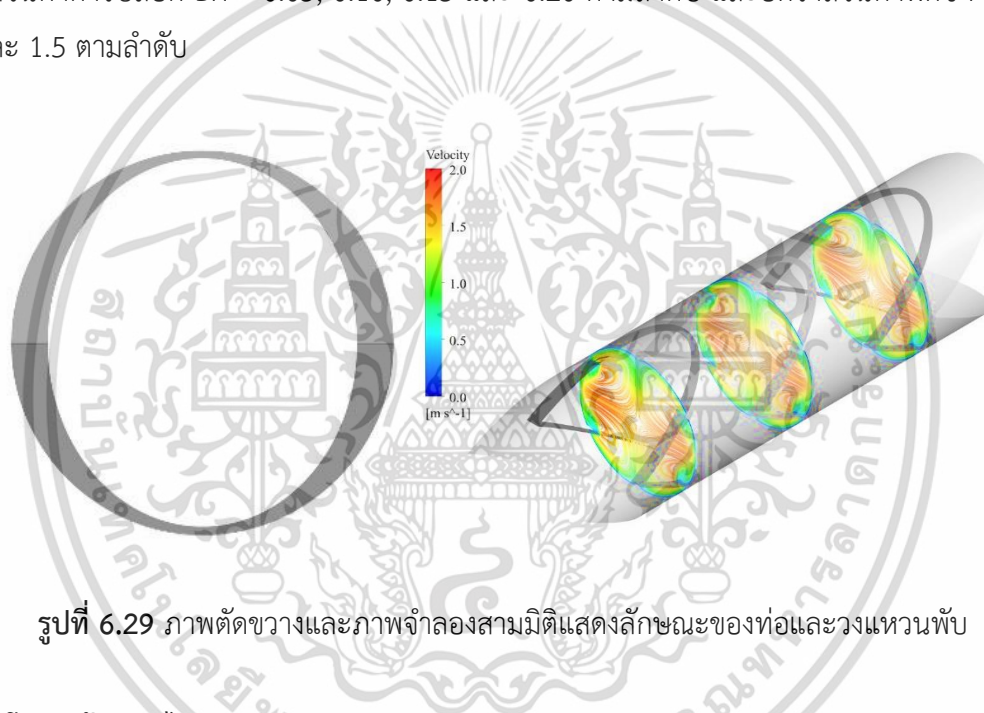
Model	Nu/Nu0	f/f0	TEF
Oval ring 30°	5.9	17.61	2.46
Oval ring 45°	8.13	103.45	1.99

จากตารางที่ 6.2 สามารถวิเคราะห์ผลสำหรับอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์สำหรับมุม 30 องศา และ 45 องศา ได้ว่า ผลจากการติดตั้งแหวนวงรีลงไปในท่อที่มุม 45 องศา ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์เพิ่มขึ้นถึง 37.79% สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สำหรับอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้ว่า ผลจากการติดตั้งแหวนวงกลมลงไปในท่อที่มุม 45 องศาทำให้ได้ค่าสูงขึ้นมาถึง 487.45% แต่ว่าเมื่อพิจารณาค่าสมรรถนะค่าการแลกเปลี่ยนความร้อน จะเห็นได้ว่าผลจากการจากการติดตั้งแหวนวงรีลงไปในท่อที่มุม 45 องศา นั้น ทำให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนลดลงถึง 19.10% ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานนั้นมากกว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนเลขนซ์เชิลท์เป็นอย่างมาก เป็นผลให้การติดตั้งแหวนวงรีที่มุม 30 องศาให้ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าการติดตั้งวงแหวนที่มุม 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.4 แหวนวงรีรีพี (V Ring)

จากการศึกษาการจำลองการติดตั้งแหวนวงกลมและวงแหวนเอียงเข้าไปในท่อกลมที่ผ่านมา ผลจากการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ การติดตั้งวงแหวนที่มุมปะทะ 30 องศา ให้สมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูงกว่าการติดตั้งวงแหวนที่ 45 องศา เนื่องจากที่มุม 45 องศา นั้นอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราส่วนเลขนซ์เซิลท์เป็นอย่างมาก และแหวนวงรียังให้ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูงกว่าแหวนวงกลม เนื่องจากมีการลดพื้นที่ปะทะระหว่างตัวสร้างความปั่นป่วนกับของไหล ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากร ในหัวข้อนี้จึงได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียเนื่องมาจากค่าความเสียดทานของการไหลในท่อกลมจากการติดตั้งแหวนวงรีพีเป็นรูปตัว V เอียงทำมุม 30 องศา ไว้ภายในท่อกลม ดังรูปที่ 6.29 ในการจำลองได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนค่าการบล็อก BR = 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ และอัตราส่วนค่าพิทซ์ PR = 0.5, 1.0 และ 1.5 ตามลำดับ

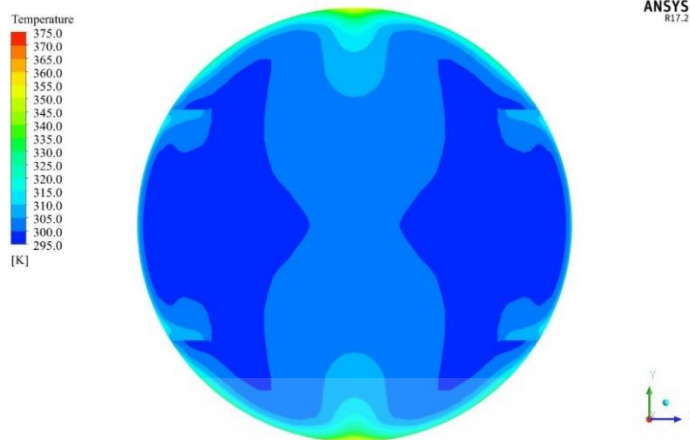


รูปที่ 6.29 ภาพตัดขวางและภาพจำลองสามมิติแสดงลักษณะของท่อและวงแหวนพี

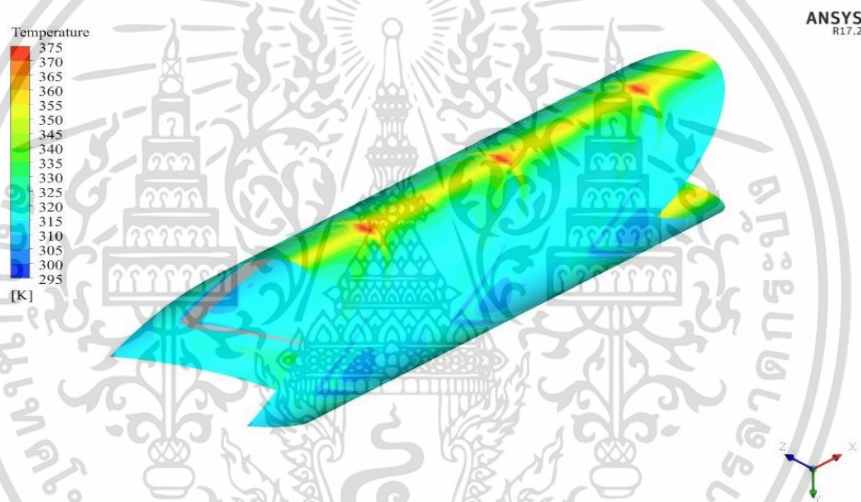
### 6.4.1 โครงสร้างการไหล

จากแผนภาพแสดงเส้นทางการไหลบนระนาบตัดขวาง รูปที่ 6.30 จะพบว่าภายในท่อจะมีกระแสไหลวนเกิดขึ้นสองคู่และพบว่ากระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจากการใส่วงแหวนพีนี้มีความรุนแรงของการไหลวนมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแหวนวงกลมและแหวนวงรี เพราะมีการขวางการไหลของของไหลที่น้อยกว่า ทำให้ได้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าการติดตั้งแหวนวงกลมและแหวนวงรี

จากแผนภูมิแสดงเลขนซ์เซิลท์บนผนังท่อรูปที่ 6.31 จะพบว่าเลขนซ์เซิลท์ที่ได้จากวงแหวนแบบวงรีมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากวงแหวนแบบกลม จึงสรุปได้ว่าการติดตั้งวงแหวนแบบรีลงไปนั้นสามารถทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าการติดตั้งวงแหวนแบบวงกลม ส่งผลให้การติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนทางการไหลโดยใช้วงแหวนแบบรีทำให้เกิดสมรรถนะการแลกเปลี่ยนทางความร้อนที่สูงกว่า



รูปที่ 6.30 ภูมิอุณหภูมิจากของไหลบนระนาบตัดขวางภายในท่อที่มีการใส่วงแหวนพับ  $BR=0.1$ ,  $PR=1.0$ ,  $Re=8000$



รูปที่ 6.31 อุณหภูมิบนผนังท่อที่มีการใส่แหวนวงรีด้านใน  $BR=0.1$ ,  $PR=1.0$ ,  $Re=8000$

#### 6.4.2 ผลการทดลองเชิงตัวเลข

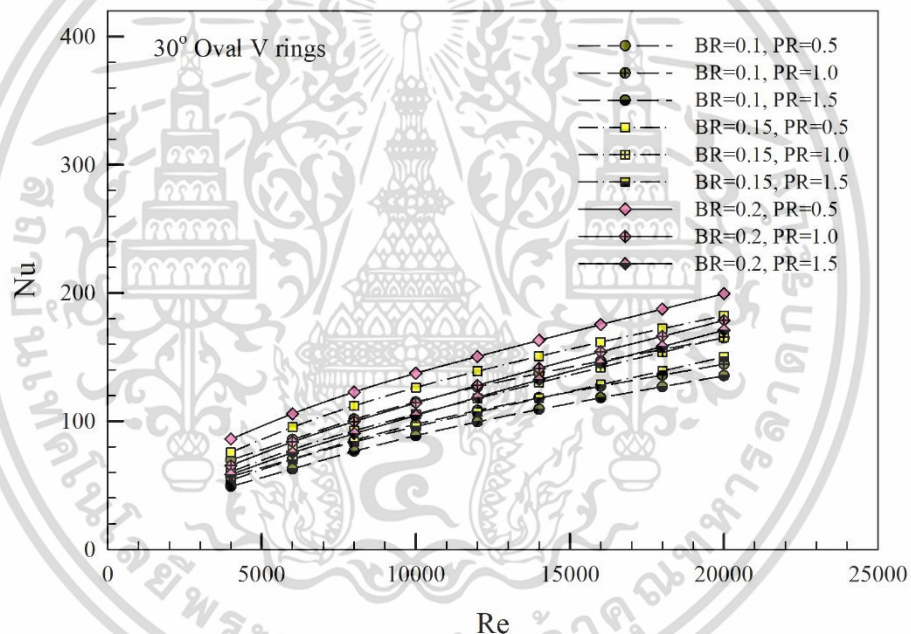
รูปที่ 6.31 และ 6.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลล์ท์ ( $Nu$ ) และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) เมื่อทำการติดตั้งวงแหวนพับภายในท่อกลมที่มีมุม 30 องศา ตามลำดับอัตราส่วนค่าการบล็อกเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์  $PR = 0.5, 1.0$  และ 1.5 ตามลำดับ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 4,000-20,000$  เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลล์ท์สูงสุดอยู่ที่ 199.51 ที่  $Re$  เท่ากับ 20000,  $BR$  เท่ากับ 0.2 และ  $PR$  เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์สูงสุดอยู่ในช่วง 6.35 ที่  $Re$  เท่ากับ 4000,  $BR$  เท่ากับ 0.2 และ  $PR$  เท่ากับ 0.5

รูปที่ 6.33 และ 6.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) เมื่อใส่วงแหวนพับ ตามลำดับ เมื่อทำการติดตั้งวงแหวนพับภายในท่อกลมที่มีมุมเท่ากับ 30 องศา ตามลำดับอัตราส่วนค่าการบล็อกเท่ากับ 0.05, 0.10,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

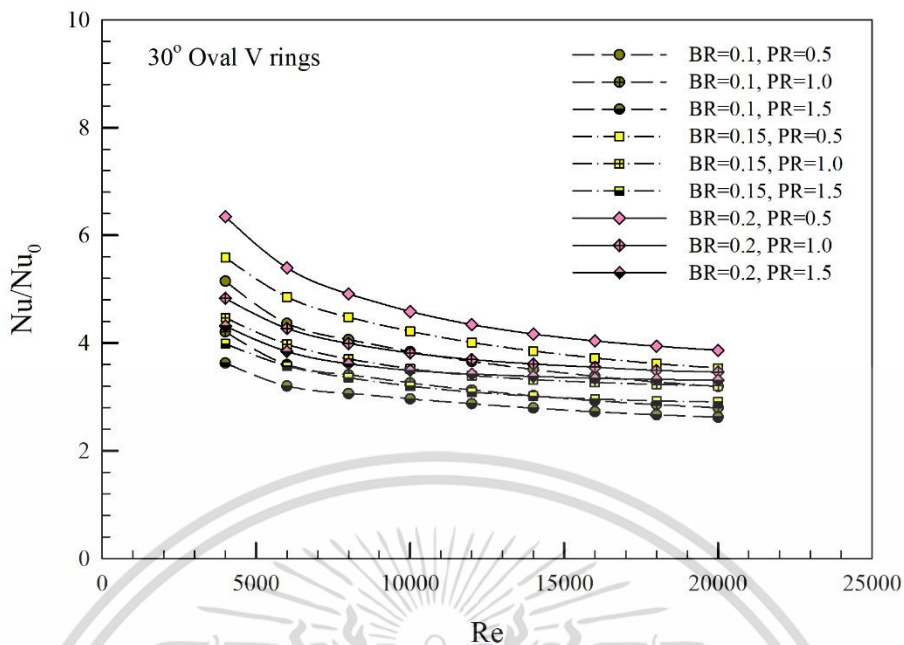
0.15 และ 0.20 และอัตราส่วนค่าพิตช์  $PR = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ตามลำดับ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 4,000-20,000$  พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานสูงสุดอยู่ที่  $0.96$  ที่  $Re$  เท่ากับ  $4000$   $BR$  เท่ากับ  $0.2$  และ  $PR$  เท่ากับ  $0.5$  และ พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานสูงสุดอยู่ที่  $27.04$  ที่  $Re$  เท่ากับ  $20000$   $BR$  เท่ากับ  $0.2$  และ  $PR$  เท่ากับ  $0.5$

รูปที่ 6.35 แสดงค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ( $TEF$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) เมื่อทำการติดตั้งวงแหวนพับภายในท่อกลมที่มีมุม  $30$  องศา ตามลำดับอัตราส่วนค่าการบล็อกเท่ากับ  $0.05, 0.10, 0.15$  และ  $0.20$  และอัตราส่วนค่าพิตช์  $PR = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ตามลำดับ และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 4,000-20,000$  เมื่อวิเคราะห์จากกราฟแล้ว ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ที่  $2.63$  ที่  $Re$  เท่ากับ  $4000$   $BR$  เท่ากับ  $0.1$  และ  $PR$  เท่ากับ  $0.5$

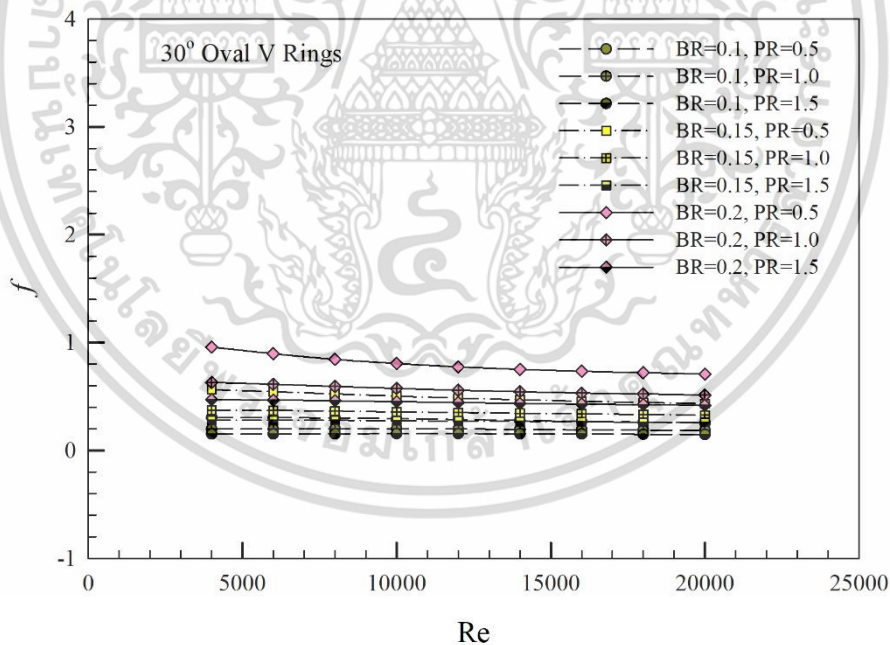


รูปที่ 6.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของวงแหวนพับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

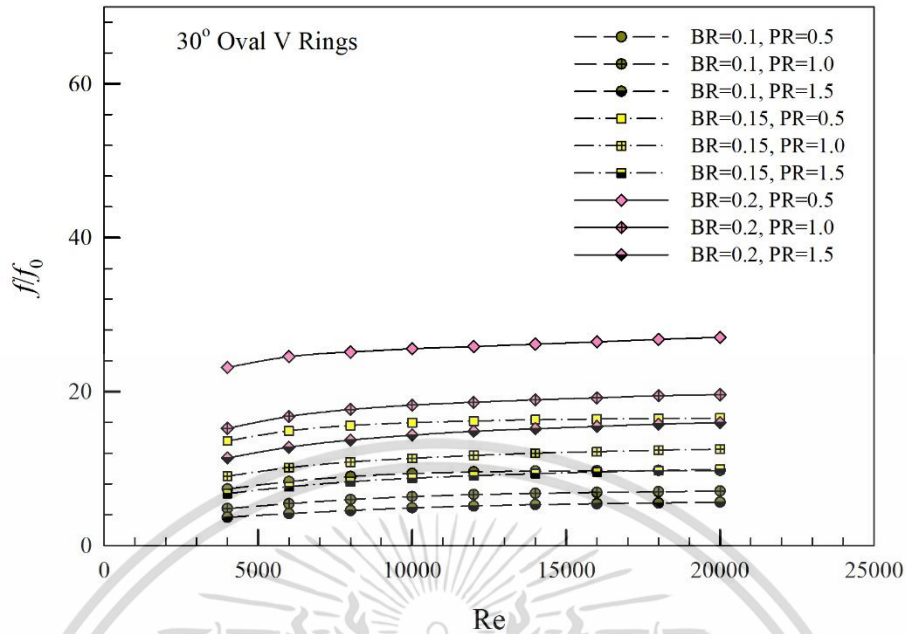


รูปที่ 6.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ของวงแหวนพับ

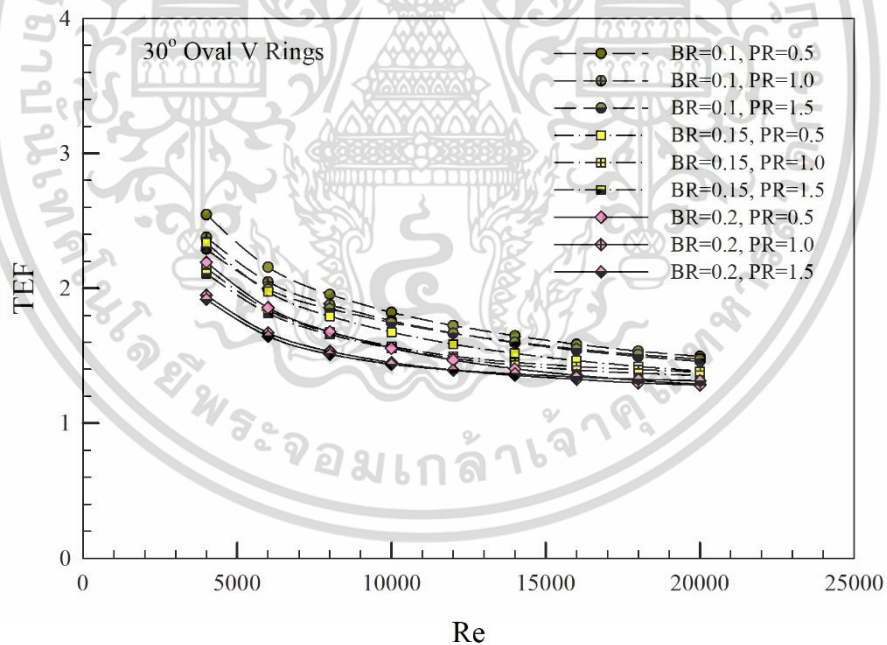


รูปที่ 6.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ของวงแหวนพับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ของวงแหวนพับ

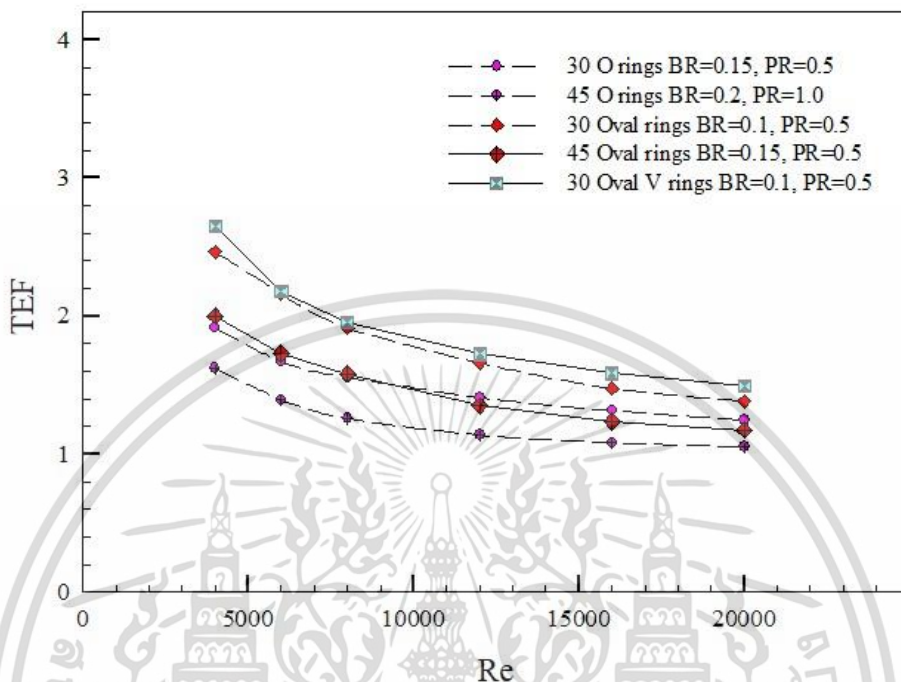


รูปที่ 6.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ของวงแหวนพับ

#### 6.4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองเชิงตัวเลข

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์จากแหวนวงกลมภายใต้การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขต่างๆที่ผ่านมาพบว่าวงแหวนจะได้ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้นเมื่อความหนาของวงแหวนบริเวณด้านบนและด้านล่างมีขนาดบางๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายกรณีปัจจัย เช่น ลักษณะการไหลของๆไหลจากการไหลผ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวสร้างความปั่นป่วน การสูญเสียเนื่องจากค่าตัวประกอบเสียดทาน รูปที่ 6.37 แสดงข้อมูลค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ เปรียบเทียบจากค่าสมรรถนะทางความร้อนที่สูงที่สุดของวงแหวนแต่ละแบบ



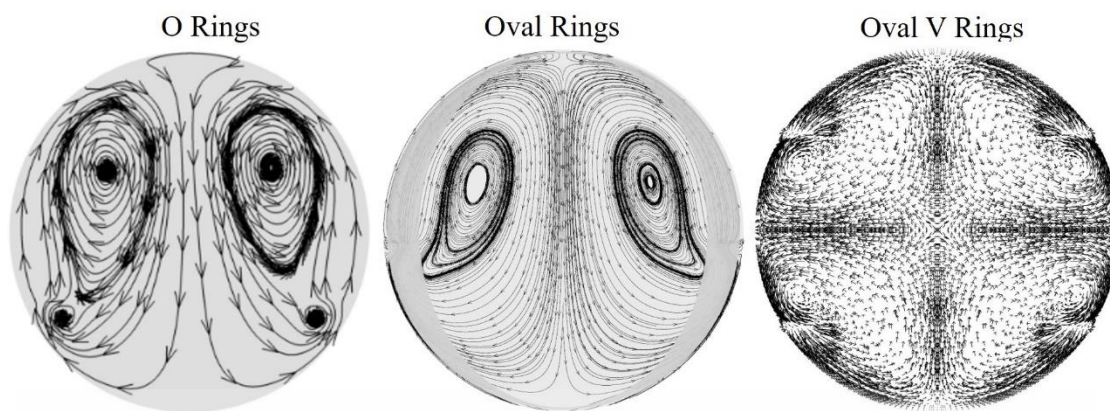
รูปที่ 6.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของวงแหวนแต่ละแบบ

หลังจากได้ผลจากการทดลองเชิงตัวเลขจากการติดตั้งวงแหวนรูปทรงต่างๆเข้าไปในท่อ สามารถสรุปผลได้ในตารางที่ 6.3 ดังนี้

ตารางที่ 6.3 แสดงผลจากการติดตั้งวงแหวนแต่ละแบบ

Model	Nu/Nu0	f/f0	TEF
Oring 30°	6.18	48.07	1.86
Oring 45°	8.14	107.23	1.8
Oval ring 30°	6.18	48.07	1.86
Oval ring 45°	8.14	107.23	1.8
Oval V ring 30°	6.34	27.04	2.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.38 กระแสเหนียวนำการไหลที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งวงแหวนรูปแบบต่างๆ ที่  $BR=0.1$ ,  $PR=1.0$ ,  $Re=8000$ ;  $\alpha = 30^\circ$ ,

เนื่องจากในกรณีของวงแหวนพับนั้นพิจารณาเฉพาะกรณีของมุม  $30^\circ$  สำหรับการวิเคราะห์ผลนั้นจึงจะเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งแหวนวงกลมที่มุม  $30^\circ$  และจากการติดตั้งแหวนวงรีที่  $30^\circ$  ผลจากการติดตั้งวงแหวนพับลงไปในห้องที่มุม  $30^\circ$  ส่งผลให้เกิดวงแหวนเหนียวนำทั้งหมดสองคู่ หมุนเหวี่ยงไปยังจุดที่วงแหวนทำการพับ ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นตรงกลางเป็นผลให้ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงกว่าวงแหวนซึ่งต่างจากกรณีของการติดตั้งแหวนวงกลมและวงรี ซึ่งเกิดวงแหวนเหนียวนำเพียงคู่เดียว แหละหมุนเหวี่ยงลงด้านล่าง การแลกเปลี่ยนความร้อนจึงทำได้ดีแค่ส่วนล่างของผิวท่อ ทำให้การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของไหลไม่ทั่วถึงเมื่อเทียบกับการติดตั้งวงแหวนพับ

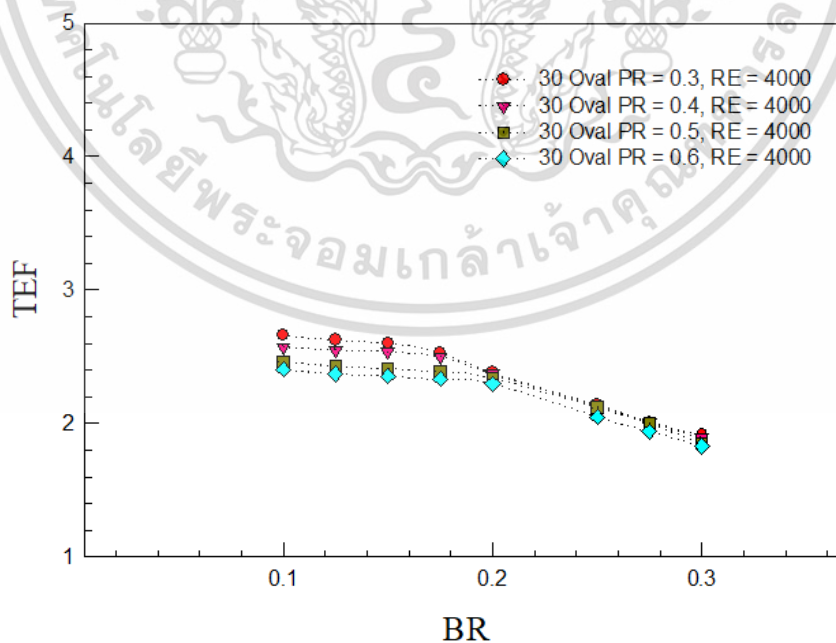
จากตารางที่ 6.3 สามารถวิเคราะห์ผลสำหรับอัตราส่วนเลขนซ์เซลล์จากการติดตั้งวงแหวนพับได้ว่า ค่าอัตราส่วนเลขนซ์เซลล์เพิ่มขึ้นถึง 2.58% เมื่อเทียบกับการติดตั้งแหวนวงกลม และ 6.94% เมื่อเทียบกับวงแหวนเอียง ในขณะที่เดียวกันเมื่อวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานจากการติดตั้งวงแหวนพับลงไปในห้องที่มุม  $30^\circ$  ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงถึง 43.74% เมื่อเทียบกับการติดตั้งแหวนวงกลมที่มุม  $30^\circ$  องศา แต่ว่าเมื่อเทียบกับการติดตั้งวงแหวนเอียงที่มุม  $30^\circ$  องศา อัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นถึง 34.87% ต่อมาพิจารณาผลของสมรรถนะค่าการแลกเปลี่ยนความร้อน จะเห็นได้ว่าผลจากการจากการติดตั้งวงแหวนพับเข้าไปในห้องที่มุม  $30^\circ$  องศา นั้น ทำให้ได้ค่าสมรรถนะทางความร้อนมากกว่าการติดตั้งแหวนวงกลมถึง 41.39% และ 6.46% เมื่อเทียบกับผลของการติดตั้งแหวนวงรี ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานของวงแหวนพับน้อยกว่าอัตราส่วนเลขนซ์เซลล์ที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เป็นผลให้การติดตั้งวงแหวนพับที่มุม  $30^\circ$  องศา ให้ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีที่สุด

## 6.5 การอภิปรายผลงานวิจัย

จากผลของการศึกษาเมื่อใส่วงแหวนรูปตัววีรูปแบบต่างๆภายในท่อกลม พบว่าให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือ การใส่วงแหวนรูปแบบต่างๆภายในท่อนั้น สามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสน้ำไหลและยังช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวท่อด้วย แต่เนื่องจากการใส่แหวนวงกลมแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลกับค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ลดต่ำลง เพราะการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบเสียดทานหลายเท่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลกับการช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งได้ทำการศึกษารูปแบบวงแหวนรูปวงรี และต่อมาจึงเป็นวงแหวนพับ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าแหวนพับให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุด แต่เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้เน้นไปที่วงแหวนแบบดั้งเดิม ผู้วิจัยจึงได้เน้นไปที่วงแหวนรูปวงรี ซึ่งจะเน้นแบบจำลองที่ได้ศึกษาหา อัตราส่วนค่าพิตซ์ (PR) และอัตราส่วนค่าการบล็อก (BR) ที่เหมาะสมในหัวข้อถัดไป

### 6.5.1 อิทธิพลจากอัตราส่วนพื้นที่การขวางการไหล

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การปรับปรุงวงแหวนแบบต่างๆ การลดพื้นที่ขวางการไหล (blockage ratio, BR) ให้น้อยลงสามารถช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานลงได้ แต่การลด BR นั้นจำเป็นที่จะต้องหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดให้ได้เสียก่อนจึงจะหาค่าตัวแปรอื่นๆ ต่อไป จึงได้ทำการทดลองลดค่า BR ของวงแหวนรูปวงรีลงไปที่อัตราส่วน 0.1 - 0.3 ทั้งสิ้น 8 ขนาด โดยค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จะถูกนำเสนอรูปที่ 6.38



รูปที่ 6.39 ความสัมพันธ์ค่าสมรรถนะทางความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนวงรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.39 เมื่อวิเคราะห์จากแนวโน้มของกราฟพบว่าค่าสมรรถนะทางความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดค่าอัตราส่วนการขวางพื้นที่การไหล ผลที่ได้พบว่า การลดค่า BR ส่งผลต่อค่าสมรรถนะทางความร้อนพบว่าที่  $PR = 0.3$ ,  $BR = 0.1$  ที่  $Re = 4000$  ของวงแหวนรูปวงรี นั้นให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดอยู่ที่ 2.66

### 6.5.2 อิทธิพลของอัตราส่วนค่าพิตซ์

ในหัวข้อต่อไปนี้จะทำการศึกษาดังอิทธิพลของอัตราส่วนพิตซ์ถึงผลกระทบต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อน โดยทำการศึกษาดังอิทธิพลของอัตราส่วนพิตซ์ที่แตกต่างกันตั้งแต่  $PR = 0.3, 0.4, 0.5$  และ  $0.6$  โดยทำการศึกษาที่  $BR = 0.1 - 0.25$



รูปที่ 6.40 ความสัมพันธ์ของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนวงรี

จากรูปที่ 6.40 เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของ PR ที่ให้ผลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อน จากแนวโน้มของกราฟพบว่าค่าสมรรถนะทางความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อ อัตราส่วนค่าพิตซ์มีค่าลดลง ซึ่งพบว่าที่  $PR = 0.3$ ,  $BR = 0.1$  นั้นให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดเท่ากับ 2.66 ที่  $Re = 4000$  ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงที่สุด

## บทที่ 7

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 7.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลของการศึกษาเมื่อใส่วงแหวนรูปแบบต่างๆภายในท่อกลม พบว่าให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือ การติดตั้งวงแหวนรูปแบบต่างๆภายในท่อกลมนั้นสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหลและยังช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวท่อเนื่องจากกระแสไหลวนเหนียวว่าการไหลที่เกิดขึ้นด้วย แต่เนื่องจากการใส่วงแหวนกลมแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลกับค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ลดต่ำลง เพราะการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบเสียดทานหลายเท่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลกับการช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งได้ทำการศึกษารูปแบบวงแหวนรูปวงรี และวงแหวนพับ อัตราส่วนพิทช์ (PR) และอัตราส่วนค่าการบล็อก (BR) ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุง จากการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้พบว่า การปรับปรุงวงแหวนที่มีรูปแบบที่แตกต่างกันนั้นให้ผลที่สอดคล้องกัน มุม 30 องศา เป็นมุมที่เหมาะสมมากที่สุด สำหรับค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนทางความร้อนนั้น พบว่าการติดตั้งวงแหวนกลมอยู่ที่ 1.86 สำหรับการติดตั้งวงแหวนรีอยู่ที่ 2.46 และ สำหรับกรณีศึกษาพิเศษ การติดตั้งวงแหวนพับให้ค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนทางความร้อนอยู่ที่ 2.63 เนื่องจากรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด สามารถทำมุมปะทะระหว่างการไหลของของไหลทดสอบกับวงแหวนพับเป็นรูปตัววีได้ดีกว่า ทำให้อัตราตัวประกอบเสียดทานลดลงไปสูง แต่ทั้งนี้การเลือกอุปกรณ์ไปติดตั้งเพื่อขวางการไหลนั้น สุดท้ายแล้วก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน และวัตถุประสงค์ความต้องการของผู้ใช้งานเป็นหลัก

จากการจำลองการทำงานเพื่อการศึกษาเชิงตัวเลขในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมด้วยการใส่แหวนวอเทคซ์ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ท่อกลมที่มีวงแหวนใส่อยู่ด้านในจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ 1.6 ถึง 8.13 เท่า ตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็น 1.84 ถึง 103.45 เท่าและค่าสมรรถนะทางความร้อนเพิ่มขึ้นมากที่สุดเป็น 2.66 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

2. สำหรับท่อกลมที่มีวงแหวนวงรีที่มีมุมเอียง 30 องศา BR = 0.1 และ PR = 0.5 จะให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ดีที่สุด และเมื่อทำการปรับปรุงเป็นเปลี่ยนอุปกรณ์ขวางการไหลเป็นวงแหวนพับจะให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนเพิ่มขึ้นมาอีก 6.46 %

3. การใส่วงแหวนรูปร่างต่างๆสามารถสร้างกระแสไหลวนขึ้น ซึ่งจะทำให้มีการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมเพิ่มมากขึ้น

4. การติดตั้งวงแหวนเหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลที่อยู่ในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนเป็นผลมาจากการหมุนวนของของไหลซึ่งจะทำให้เกิดการกวาดของอนุภาคของของไหลสู่บริเวณผิวที่อกลมส่งผลให้ของไหลบริเวณผิวของที่อกลมมีการกระจายตัวดีขึ้นแต่ในขณะเดียวกันการหมุนวนนี้จะเข้าขัดขวางการไหลของของไหลซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเสียดทานด้วยเช่นกัน

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

การจำลองการถ่ายเทความร้อนโดยการใส่วงแหวนรูปร่างต่างๆในที่อกลมที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้นอาจเป็นทางเลือกหนึ่งของการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนซึ่งอาจนำไปสู่การประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ทางด้านความร้อนโดยทั่วไปได้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อควรให้ความสนใจเกี่ยวกับการทดลองนี้อีกเล็กน้อยตัวอย่างเช่น

1. จากการทดลองนี้จะเห็นว่าสมรรถนะทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะมีค่ามากเพียงด้านข้างของท่อด้านเดียว จึงเหมาะกับอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายเทความร้อนเพียงด้านเดียวเช่น เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์
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 ทริปเพิล เอ็ดดูเคชั่น จำกัด. 2558.
- [2] มนตรี พิรุณเกษตร. กลศาสตร์ของไหล.  
กรุงเทพมหานคร : บริษัทวิทย์พัฒน์ จำกัด. 2552.
- [3] Akansu, S.O. Heat transfers and pressure drops for porous-ring turbulators in a circular pipe. *Applied Energy*. 2006
- [4] Berner, C., Durst, F. and McEligot, D.M. 1984. "Streamwise-periodic Flow around Baffles." in: *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics*. Lisbon, Portugal.
- [5] Eiamsa-ard, S. Experimental investigation of heat transfers and turbulent flow friction in a tube fitted with perforated conical-ring.  
*International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2010
- [6] Ooi, A. et al. 2002. "Reynolds Averaged Simulation of Flow and Heat Transfer in Ribbed Ducts." *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 23: 750–757
- [7] Ozceyhan, V., Gunes, S., Buyukalaca, O. and Altuntop, N. Heat transfer enhancement in a tube using circular cross sectional rings separated from wall.  
*Applied Energy*. 2008
- [8] Patankar, S. V., Liu, C. H. and Sparrow, E. M. 1977. "Fully Developed Flow and Heat-Transfer in Ducts Having Streamwise-Periodic Variations of Cross-Sectional Area." *ASME J. Heat Transfer*. 99: 180–186.
- [9] Promvong P., Sripattanapipat S., Tamna S., Kwankaomeng S. and Thianpong C. Numerical investigation of laminar heat transfer in a square channel with 45° inclined baffles.  
Bangkok : Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 2013
- [10] P. Promvong, N. Koolnapadol, M. Pimsarn, C. Thianpong. Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings.  
Bangkok : Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 2013
- [11] V. Kongkaitpaiboon, K. Nanan, S. Eiamsa-ard. Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bangkok : Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering  
Mahanakorn University of Technology. 2010

- [12] Webb G.W. and Ramadhyani S. 1985. “Conjugate Heat Transfer in a Channel with Staggered Ribs.” *Int. J. Heat Mass Transfer.* 28 : 1679–1687.
- [13] W. Chingtuaythong, P. Promvongse, C. Thianpong, M. Pimsarn. Heat transfer characterization in a tubular heat exchanger with V-shaped rings.  
Bangkok : Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang. 2016
- [14] Yilmaz, M. 2003. “The Effect of Inlet Flow Baffles on Heat Transfer.” *Int. Commun. Heat Mass Transfer.* 30 (8): 1169–1178.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg.K)	$\mu \times 10^7$ (N.s/m <sup>3</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \times 10^6$ (W/m.K)	$\alpha \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
อากาศ							
100	3.25562	1.032	71.1	2.0	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.59	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	22.5	0.707
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.990	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	441.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	67.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	296	137	589	0.672

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST -30 การประชุมวิชาการเครื่องช่วยวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31  
4 - 7 กรกฎาคม 2560 จังหวัดนครนายก



## การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขของการไหลในท่อแบบ ปั่นป่วนผ่านวงแหวนเอียง Numerical Heat Transfer Investigation of Turbulent Tube Flow through Inclined Vortex Rings

วัชรีย์ สอดศรี<sup>1</sup>, สมบัติ ทำนา<sup>2</sup>, ชินรัชช์ เรียงพงษ์<sup>1</sup>, พงษ์ศักดิ์ คำมูล<sup>1</sup>, และ พงษ์เจต  
พรหมวงศ์<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

<sup>2</sup> ห้องปฏิบัติการวิจัยคณิตศาสตร์ประยุกต์และกลศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีไทย - ญี่ปุ่น

เลขที่ 1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

\*ติดต่อ: kpongjet@gmail.com, โทรศัพท์: 02-3298351, โทรสาร: 02-3298352

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหาวิธีเพิ่มสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้วงแหวนเอียง (Inclined vortex rings, VRs) วางทำมุมปะทะ  $30^\circ$  ไปตลอดของความยาวท่อผิวเรียบ ภายใต้เงื่อนไขการถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ และของไหลที่ใช้ทดสอบเป็นอากาศไหลผ่านท่อที่เลขเรย์โนลด์ส์ตั้งแต่ 4000 - 20,000 หลังจากติดตั้งวงแหวนเอียงในท่อ จะก่อให้เกิดการรบกวนการไหลของอากาศและก่อให้เกิดการไหลหมุนควงสองวงที่มีความปั่นป่วนมากขึ้น ของไหลเกิดการหมุนวนจากจุดศูนย์กลางไปสู่ผนังท่อ ทำให้มีโอกาสแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลมากขึ้น พิจารณาการถ่ายเทความร้อนในเทอมของเลขนัสเซลท์ (Nu) และการสูญเสียความดันในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) จากผลการจำลองพบว่า การติดตั้งวงแหวนเอียงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด 2.19 ที่ค่า  $\alpha = 30^\circ$ ,  $Pr = 1$  และ  $Br = 0.1$

**คำหลัก:** การถ่ายเทความร้อน, การไหลแบบปั่นป่วน, วงแหวนเอียง

### Abstract

This paper proposes a new methodology to enhance the thermal performance of a uniform heat-fluxed tube using inclined vortex rings (VRs). In the present work, VR elements at an attack angle of  $30^\circ$  were mounted periodically inside the test tube. Air was employed as the test fluid with Reynolds number from 4000 to 20,000. The study reveals that the insertion of the VRs can create two counter-rotating vortices along the tube that help increase the turbulence intensity apart from conveying the colder fluid from the core to the heated-wall region. The VR insert provides higher heat transfer and pressure drop



increase than the smooth tube alone. Also, the tube fitted with VRs has higher thermal performance than the smooth tube. The highest thermal performance for using the  $30^\circ$  VRs is found to be 2.19 at  $P_R = 1$  and  $B_R = 0.1$ .

**Keywords:** Numerical analysis; Heat transfer; Vortex ring; Turbulent flow, Vortex generator

### 1. บทนำ

การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นในอุตสาหกรรม ตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ อุตสาหกรรมได้นำเอาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาประยุกต์ใช้ในระบบมากมายทั้งมีการแข่งขันและพัฒนานวัตกรรมหรือผลิตภัณฑ์มากขึ้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงต้องมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย เทคโนโลยีในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจึงสำคัญอย่างยิ่งยวดต่อการออกแบบและประยุกต์ใช้งานได้อย่างมากมาย อาทิ เช่น เครื่องอบแห้ง เตาดเผา เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แผงระบายความร้อน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องทำความเย็น เครื่องกลั่น เครื่องควบแน่น เครื่องยนต์ เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิตต่างๆ ในอุตสาหกรรม เป็นต้น หลักการออกแบบอุปกรณ์หรือระบบที่มีการถ่ายเทหรือแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่ดีที่ต้องการ เช่น สามารถทำงานได้ตามความต้องการ ต้นทุนที่คุ้มค่า สมรรถนะในการถ่ายเทและแลกเปลี่ยนความร้อนสูง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด อายุการใช้งานที่ยืนยาว การบำรุงรักษา ซ่อมแซมไม่ยุ่งยาก รวมทั้งมีความน่าเชื่อถือและปลอดภัยสูง เพื่อให้บรรลุคุณลักษณะที่ต้องการเหล่านี้ พื้นฐานสำคัญคือการพัฒนาขีดความสามารถ

และศักยภาพของระบบภายใต้ความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเพื่อลดการใช้พลังงาน และขนาดที่เหมาะสมกะทัดรัดนั้นทำให้ลดการใช้วัสดุและพื้นที่ติดตั้งใช้งาน ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน เพราะการจัดสรรทรัพยากรเชื้อเพลิงและวัสดุได้อย่างคุ้มค่าสูงสุด

การใช้ตัวสร้างการไหลปั่นป่วน (Turbulators) เป็นอีกวิธีหนึ่งของวิธี passive เนื่องจากเป็นการสอดใส่หรือติดตั้งอุปกรณ์เข้าไปในช่องทางการไหล ได้แก่ ขดลวด (wire coils) แหวนแบบกรวย (conical ring) แผ่นใบบิด (twisted tape) ปีก (winglet) เป็นต้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลหมุนวน หรือเกิดการไหลอันดับสอง (secondary flow) [1] ตัวสร้างการไหลปั่นป่วนได้ถูกนำไปใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างหลากหลายรูปแบบ เพราะเมื่อใส่ตัวสร้างการไหลปั่นป่วนเข้าไปในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากของไหลเกิดการไหลแบบปั่นป่วนอย่างรุนแรง

การศึกษาศักยภาพการถ่ายเทความร้อนของตัวสร้างการไหลปั่นป่วนแต่ละชนิดเป็นไปอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ซึ่งในบทความนี้พิจารณาตัวสร้างการไหลปั่นป่วนเพียง 1 ชนิดคือ วงแหวน (rings) วงแหวน เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลแบบย้อนกลับ (reverse flow device) ส่งผลให้เกิดการไหลแบบ



ย้อนกลับและ ทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและการถ่ายเทโมเมนตัมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นแต่จะเกิดการสูญเสียความดันเพิ่มตามมา

เนื่องจาก ระบบท่อจริงในทางอุตสาหกรรมมีความยาวมากจึงมีผู้นำเสนอหลักการของการไหลที่มีการปรับตัวเต็มที่ในท่อ (fully develop) และมีการไหลแบบเป็นคาบ (periodic) ที่ทำการศึกษโดย Eiamsa-ard และคณะ [2] การวิจัยของ Ozceyhan และคณะ [3] ได้ศึกษาเชิงตัวเลขของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งได้รับผลกระทบจากช่องว่างระหว่างวงแหวนกลมกับผนังท่อ การศึกษาได้ข้อสรุปว่าเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี วงแหวนกลม (circular ring) ไม่ควรวางติดกับผิวท่อ ซึ่งข้อสรุปนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Akansu [4] ซึ่งได้ศึกษาและวิเคราะห์การไหลบนเงื่อนไขของระยะห่างต่างๆ ระหว่างตัวสร้างการไหลปั่นป่วน (porous rings) กับผนังท่อ และระยะพิตซ์ที่ต่างกัน ได้ข้อสรุปว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน จะเพิ่มขึ้นเมื่อลดพื้นที่ของวงแหวนลง ต่อมา Promvonge และคณะ [5] ได้ทำการศึกษารววิจัยโดยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบในท่อจัดรัศมีที่มีการติดตั้งแผ่นกันเอียงมุม  $45^\circ$  บนผนังด้านหนึ่งของท่อ จากการศึกษาพบว่าแผ่นกันวางเอียงทำให้เกิดการไหลหมุนวนแบบคู่ซึ่งกระแสการไหลที่หมุนวนนี้จะไปกระแทกส่วนที่เป็นผนังท่อทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน โดยค่าสมรรถนะการเพิ่มการ

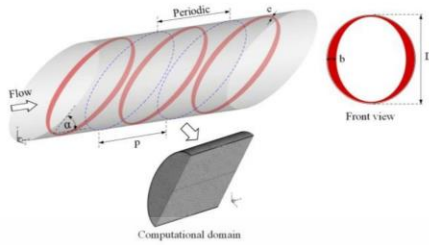
ถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเท่ากับ 2.2 ในกรณี  $B_R = 0.4$  ที่  $Re = 1200$

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการไหลในท่อที่มีการติดตั้งวงแหวนเอียงมุม  $30^\circ$  ที่มีอัตราส่วนระยะพิตซ์ ( $P_R = 1$  และ  $1.5$ ) และอัตราส่วนการกั้นการไหลที่ต่างกัน ( $B_R = 0.1, 0.15$  และ  $0.2$ ) โดยใช้ค่าเลขเรย์โนลด์สตั้งแต่ 4000-20,000 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ พบว่าการสอดใส่วงแหวนเอียง มีผลช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ไม่มีการใส่ตัวสร้างการไหลปั่นป่วน อัตราส่วนระยะพิตซ์และอัตราส่วนการกั้นการไหลที่ค่าต่างกัน ล้วนส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเช่นกัน

## 2. แบบจำลองและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ท่อติดตั้งวงแหวนเอียง

แบบจำลองที่สนใจศึกษาเป็นทอกลมผิวเรียบติดตั้งวงแหวนรูปร่างเอียงไปตลอดความยาวท่อ วงแหวนมีช่องว่างจากผิวท่อถึงวงแหวน  $0.5 \text{ mm}$  วางทำมุมปะทะการไหล  $\alpha = 30^\circ$  ความกว้างด้านบนและล่างวงแหวนคงที่  $e = 0.5 \text{ mm}$  มีการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างด้านข้าง  $b$  ที่อัตราส่วนการกั้นการไหลสามค่าคือ  $B_R = b/D = 0.1, 0.15$  และ  $0.2$  ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างวงแหวนเอียงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ หรืออัตราส่วนระยะพิตซ์ แปรเปลี่ยนสองค่าคือ  $P_R = p/D = 1$  และ  $1.5$  ตามลำดับ ทอกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D = 50 \text{ mm}$  ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นคาบอย่างสมบูรณ์ (fully periodic flow)



รูปที่ 1 ท่อกลมติดตั้งวงแหวนเอียงรูปวงรี และโดเมนที่ใช้คำนวณเชิงตัวเลข โดยพิจารณาการไหลเป็นคาบ

2.2 สมมติฐาน

แบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม มีสมมติฐานดังต่อไปนี้ พิจารณาการไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ กำหนดให้คุณสมบัติของไหลคงที่ ไหลแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้ ไม่พิจารณาแรงวิฤต การสูญเสียเนื่องจากความหนืดและการแผ่รังสีความร้อน พิจารณาวงแหวนเอียงไม่ถ่ายเทความร้อน(เป็นฉนวน)

2.3 สมการที่เกี่ยวข้อง

จากสมมติฐานข้างต้น สมการควบคุมหรือสมการหลักสำหรับการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อน ประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน พิจารณาในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนสามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง:  

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \tag{1}$$

สมการโมเมนตัม:  

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

(2)  
 สมการพลังงาน:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\Gamma + \Gamma_r) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \tag{3}$$

เมื่อ  $\Gamma$  และ  $\Gamma_r$  คือ การแพร่ทางความร้อนและการแพร่ทางความร้อนในการไหลปั่นป่วน กำหนดโดย

$$\Gamma = \frac{\mu}{Pr} \text{ และ } \Gamma_r = \frac{\mu}{Pr_r} \tag{4}$$

สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงานจะใช้แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก (QUICK) และทำการคำนวณหาผลเฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง โดยการใช้แผนผังวิธีแบบ SIMPLE และใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน RNG  $k-\epsilon$  ซึ่งสำหรับสมการของ  $k$  และ  $\epsilon$  นั้น แสดงได้ดังนี้:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon - Y_M + S_k \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{1.5} \epsilon} + C_{1\epsilon} \frac{3}{k} C_3 G_k + S_\epsilon \tag{6}$$

การศึกษาครั้งนี้มีตัวแปรที่ต้องหาทั้งหมด 4 ตัว คือ เลขเรย์โนลด์ส์ (Re) ตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) เลขนัสเซลท์ (Nu) และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์ส์ นิยามโดย

$$Re = \frac{uD}{\nu} \tag{7}$$

ตัวประกอบเสียดทานคำนวณได้จากความดันลด ( $\Delta p$ ) ตลอดของช่วงความยาว  $L$  ของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

$$f = \frac{2D(\Delta p)}{L \rho u^2} \tag{8}$$

การถ่ายเทความร้อนเขียนในรูปไร้มิติพิจารณาได้จากเลขนัสเซลท์ คือ

$$Nu = \frac{hD}{k_a} \tag{9}$$



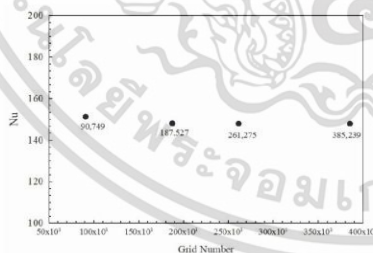
และตัวแปรสุดท้าย ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน คือค่าที่พิจารณาจากอัตราส่วนการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ต่ออัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่กำลังขับปั๊มเดียวกัน

$$TEF = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (10)$$

เมื่อ  $Nu_0$  และ  $f_0$  คือ เลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบที่ของไหลเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนตามพื้นผิวท่อ ตามลำดับ

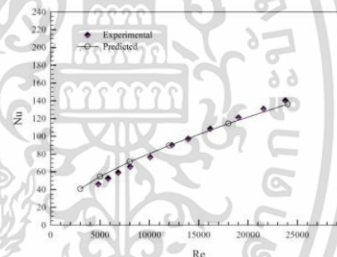
### 3. ความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลข

**3.1 จำนวนกริดอิสระ**  
ในการศึกษานี้ได้ใช้จำนวนกริดแตกต่างกันทั้งหมด 4 ค่า ที่  $Re = 12,000$  จากรูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $Nu$  จากการจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้จำนวนกริด 90749, 187527, 261275 และ 385239 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า  $Nu$  ระหว่างการใช้จำนวนกริด 90749 และ 187527 เปลี่ยนแปลงอยู่ที่ 1.021% ในขณะที่ค่า  $Nu$  ระหว่าง 187527 กับ 261275 และ ระหว่าง 261275 กับ 385239 มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า 1.0% ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริดที่ประมาณ 187527 ไปใช้ในการศึกษาทอกลมที่ติดตั้งวงแหวนเอียงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไป

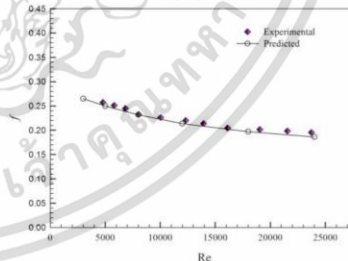


รูปที่ 2 ค่าเลขนัสเซลท์ที่มีจำนวนกริดแตกต่างกัน

**3.2 ความถูกต้องของแบบจำลอง**  
เปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองเชิงตัวเลข กับการทดลองเชิงปฏิบัติ [6] โดยผลของ  $Nu$  และ  $f$  สำหรับท่อที่ใช้ตัวกอกวนการไหลเป็นวงแหวนกลมวางเอียง (inclined circular ring) ที่มีมุมปะทะ  $30^\circ$ ,  $B_R = 0.1$ ,  $P_R = 1.0$  แสดงผลในรูปที่ 3 (ก) และ 3 (ข) ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าผลของ  $Nu$  และ  $f$  จากการจำลองเชิงตัวเลขสอดคล้องกับผลการทดลองเชิงปฏิบัติการ และแปรเปลี่ยนไปในทางเดียวกันกับการทดลองเชิงปฏิบัติการ ซึ่งผลของ  $Nu$  แตกต่างกันอยู่ที่  $\pm 12\%$  และ  $f$  อยู่ที่  $\pm 6\%$  ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้กับกรณีศึกษาอื่นๆ ต่อไป



(ก)



(ข)

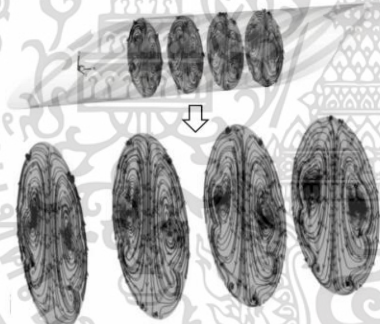


รูปที่ 3 (ก) ค่า  $Nu$  และ (ข) ค่า  $f$  จาก  
การจำลองเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง  
เชิงปฏิบัติการ

#### 4. ผลการจำลองเชิงตัวเลข

##### 4.1 พฤติกรรมการไหล

จากรูปที่ 4 พบว่าเมื่ออากาศไหลใน  
ท่อผ่านวงแหวนเอียงจะทำให้กระแสการ  
ไหลของอากาศเกิดการไหลหมุนควงสอง  
วง (กระแสหมุนควงคู่) มีทิศการหมุน  
ตรงข้ามกัน เหนียวนำดึงกระแสการไหล  
ออกจากผนังด้านบนลงกระแสพุ่ง  
ด้านล่างแล้วผ่านผนังด้านข้าง ส่วน  
กระแสที่ไม่ได้กระแสพุ่งลงด้านล่าง  
จะแยกหมุนรอบแกนของแต่ละกระแส  
การไหลหมุนควง ซึ่งกระแสการไหล  
หมุนจะเกิดการไหลปั่นป่วนและผสม  
คลุกเคล้าดึงกระแสเข้าสู่แกนการไหล จึง  
ทำให้อากาศที่อยู่บริเวณผนังถูกดึงเข้าสู่  
บริเวณกึ่งกลางท่อ

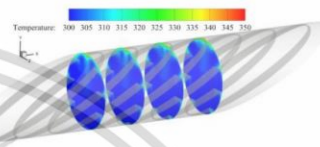


รูปที่ 4 เส้นกระแสการไหลบนระนาบ  
ตัดขวางต่างๆ ในท่อที่ติดตั้งวงแหวน  
เอียง  $\alpha = 30^\circ$

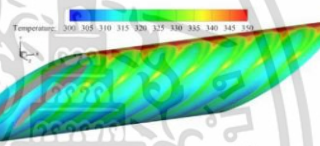
##### 4.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

การกระจายตัวของอุณหภูมิบน  
ระนาบตัดต่างๆ กรณีท่อติดตั้งวงแหวน  
เอียง  $\alpha = 30^\circ$  ได้แสดงในรูปที่ 5 ผลจาก  
การที่อากาศไหลผ่านวงแหวนเอียง

ภายใต้เงื่อนไข  $Pr = 1$ ,  $Br = 0.2$  ที่  
 $Re = 4000$  ทำให้อากาศไหลหมุนควง  
และปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น จะส่งผลให้  
อากาศที่มีอุณหภูมิเป็นตรงบริเวณกลาง  
ท่อกระจายไปรับความร้อนที่ผิวท่อทำให้  
เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น สังเกต  
ได้จากคอนทัวร์อุณหภูมิมีระดับอุณหภูมิ  
ตรงกลางท่อบางขึ้น



รูปที่ 5 คอนทัวร์อุณหภูมิบนระนาบ  
ตัดขวางต่างๆ ในท่อที่ติดตั้งวงแหวน  
เอียง  $\alpha = 30^\circ$



รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิบนผิวท่อที่  
ติดตั้งวงแหวนเอียง  $\alpha = 30^\circ$

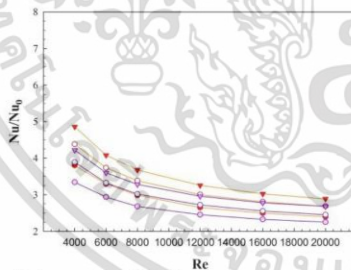
รูปที่ 6 แสดงคอนทัวร์อุณหภูมิ  
บริเวณผิวท่อกรณีติดตั้งวงแหวนเอียง  $\alpha = 30^\circ$   
ภายใต้เงื่อนไข  $Pr = 1$ ,  $Br = 0.2$  ที่  $Re = 4000$  เป็นตัวอย่างแสดง  
ให้เห็นถึงการไหลหมุนควงที่เกิดขึ้นจาก  
การที่อากาศไหลผ่านวงแหวนเอียง  
นอกจากจะส่งผลให้อากาศเกิดการผสม  
กันได้ดีแล้ว ยังเกิดการเหนียวนำการ  
ไหลให้ไหลกระแทกที่บริเวณผนัง  
ด้านข้างและด้านล่างของท่อ จะส่งผลให้  
อากาศบริเวณผิวท่อด้านข้างและด้านล่าง  
มีอุณหภูมิเย็นลง ส่วนที่ผนังด้านบน  
ไม่เกิดการไหลกระแทกจึงทำให้อุณหภูมิ



ผิวท่อบริเวณนั้นยังคงสูงอยู่ สังเกตได้จากคอนทิวรัลของหมึกที่ผนังท่อด้านบนจะมีสีแดง ส่วนที่บริเวณด้านข้างและด้านล่างจะมีสีน้ำเงินซึ่งอุณหภูมิต่ำเพราะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดี

**4.3 การถ่ายเทความร้อน**

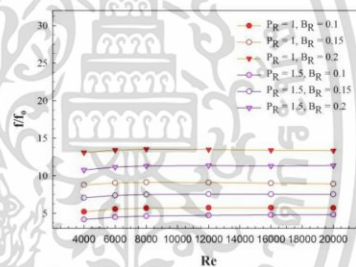
จากพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่ได้อธิบายมาก่อนนี้ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนซึ่งพิจารณาโดยค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลที่ระหว่างท่อติดตั้งวงแหวนเอียงต่อท่อเปล่าผิวเรียบ ( $Nu/Nu_0$ ) แสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่า  $Nu/Nu_0$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนก้นการไหล  $B_R$  ขึ้นจะให้ค่า  $Nu/Nu_0$  มีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม เนื่องจากเกิดการเหนี่ยวนำการไหลให้การหมุนควงมีความรุนแรงมากยิ่งขึ้นจะเกิดการผสมอากาศที่ร้อนและเย็นได้ดีขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระยะพิทซ์  $P_R$  ทำให้ค่า  $Nu/Nu_0$  มีค่าลดลง เนื่องจากจากระยะพิทซ์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความรุนแรงของการไหลหมุนควงลดลง ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าที่  $\alpha = 30^\circ$ ,  $P_R = 1$ ,  $B_R = 0.2$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0$  สูงสุด โดยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบ 4.86 เท่า



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu/Nu_0$  กับ  $Re$

**4.4 ตัวประกอบเสียดทาน**

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานระหว่างท่อที่มีการติดตั้งวงแหวนเอียงและท่อเปล่าผิวเรียบ ( $f/f_0$ ) จะเห็นได้ว่า  $f/f_0$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอัตราการไหล และพบว่าเมื่ออัตราส่วนก้นการไหล  $B_R$  เพิ่มขึ้น ค่า  $f/f_0$  ก็เพิ่มขึ้นตาม สืบเนื่องมาจากค่า  $B_R$  ที่สูงกว่าจะเกิดความดันลดมากกว่ากรณีนี้ค่า  $B_R$  ที่น้อยกวาและเมื่อลดระยะพิทซ์ลงหรือลดค่า  $P_R$  ทำให้ค่า  $f/f_0$  มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากระยะพิทซ์สั้นๆ จะไปรบกวนการไหลให้หมุนควงเพิ่มขึ้นเกิดความดันลดที่มากกว่ากรณีระยะพิทซ์ที่ยาวกว่า จากการศึกษาพบว่าท่อที่ติดตั้งวงแหวนเอียง  $\alpha = 30^\circ$  กรณี  $P_R = 1$ ,  $B_R = 0.2$  ให้ค่า  $f/f_0$  สูงสุด โดยมีค่าตัวประกอบเสียดทานประมาณ 13.52 เท่าของท่อเปล่าผิวเรียบ



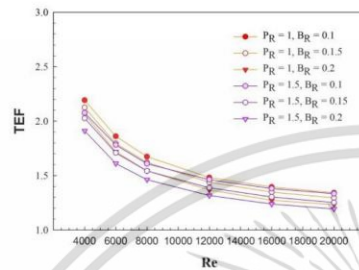
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$

**4.5 ตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน**

ในรูปที่ 9 แสดงค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนกับความเสียดทานที่เกิดขึ้นที่กำลังขับปั๊มเดียวกัน ในท่อที่ติดตั้งวงแหวนเอียงที่มีอัตราส่วนการก้นการไหลและอัตราส่วนระยะพิทซ์ต่างกัน ทุกกรณีศึกษาจากการ



จำลองเชิงตัวเลข สังเกตเห็นว่าค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น และพบว่าท่อที่มีการติดตั้งวงแหวนเอียง  $\alpha = 30^\circ$  กรณี  $P_R = 1$ ,  $B_R = 0.1$  ที่  $Re = 4000$  ให้ค่า TEF สูงที่สุดถึง 2.19



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง TEF กับ Re

### 5. สรุปผล

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและการไหลของอากาศในทอกลมผ่านวงแหวนเอียง  $\alpha = 30^\circ$  ที่กรณีศึกษาต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียเนื่องจากความเสียดทาน ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นคาบ โดยแสดงพฤติกรรมไหลในรูปของเส้นกระแสการไหลบนระนาบตัดขวางต่างๆ พฤติกรรมถ่ายเทความร้อน โดยแสดงคอนทัวร์อุณหภูมิที่ระนาบตัดขวางต่างๆ และที่ผนังท่อ พบว่ากรณีศึกษาที่ให้การแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดนั้นจะเกิดความเสียดทานสูงตามไปด้วย อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสำหรับท่อที่ติดตั้งวงแหวนเอียงจะให้ค่าสูงกว่าท่อเปล่าผิวเรียบ และค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่เนื่องจากอิทธิพลจากการวางวงแหวนเอียงเพื่อขวางการไหลให้ค่า TEF สูงสุดถึง 2.19 ที่กรณีศึกษา  $P_R = 1$ ,  $B_R = 0.1$  ที่  $Re = 4000$  ดังนั้นในช่วงที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

ควรจะเลือกจากค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สูงพอประมาณ ซึ่งมีค่าสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานที่ไม่มากจนเกินไป

### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Esparza, D.M. and Rojas, E.S. (2011). Numerical simulations of the laminar flow in pipes with wire coil inserts, *Computers & Fluids*, vol. 44, May 2011, pp. 169 - 177.
- [2] Eiamsa-ard, S. (2010). Experimental investigation of heat transfers and turbulent flow friction in a tube fitted with perforated conical-ring, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, May 2010, pp. 560 - 567.
- [3] Ozceyhan, V., Gunes, S., Buyukalaca, O. and Altuntop, N. (2008). Heat transfer enhancement in a tube using circular cross sectional rings separated from wall, *Applied Energy*, vol. 85, October 2008, pp. 988-1001.
- [4] Akansu, S.O. (2006). Heat transfers and pressure drops for porous-ring turbulators in a circular pipe, *Applied Energy*, vol. 83, February 2006, pp. 280 - 298.
- [5] Promvong P., Sripattanapipat S., Tamna S., Kwankaomeng S. and Thianpong C., (2010). Numerical investigation of laminar heat transfer in a square channel with  $45^\circ$  inclined baffles, *International*

**CST -30** การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31  
4 - 7 กรกฎาคม 2560 จังหวัดนครนายก



*Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, February 2010, pp. 170-177.

[6] Promvong P., Koolnapadol N., Pimsarn M., and Thianpong C., (2014). Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings, *Applied Thermal Engineering*, vol. 62, January 2014, pp. 285-292



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาววัชรีย์ สอดศรี
วัน เดือน ปีเกิด	4 พฤศจิกายน 2533
ที่อยู่	111/5 หมู่ 2 ตำบลบางขุน อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี รหัสไปรษณีย์ 11130
เบอร์โทร	097-2729784
ประวัติการศึกษา	2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	ตำแหน่งวิศวกรควบคุมคุณภาพ บริษัทฟูจิคุระ อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด 101/2 หมู่ 20 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอลำลูกกา จังหวัด ปทุมธานี 12120
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31 (4-7 กรกฎาคม 2560 จังหวัดสงขลา) ในหัวข้อ การศึกษาการถ่ายเทความร้อน เชิงตัวเลขของการไหลในท่อแบบปั่นป่วนผ่านวงแหวนเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้