

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบลามินาร์ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส
ที่มีการติดตั้งแผ่นออริฟิสเอียงทำมุม

Numerical Simulation of Laminar Heat Transfer in a Square Duct fitted
with Angled Orifices



T119368



b. 119368
i.

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 119368
วัน,เดือน,ปี..... 7 S.ค. 2554

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2553

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบลามินาร์ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นออริฟิสเอียงทำมุม

Numerical Simulation of Laminar Heat Transfer in a Square Duct fitted with Angled Orifices

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติราช ตัจฉิวิทย์ รหัสประจำตัว 50010126
2. นายพิทักษ์ พร้อมโรตอง รหัสประจำตัว 50011099
3. นายมรุต อุกฤษณ์โนรธ รหัสประจำตัว 50011221




อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบลามินาร์ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่น
ออร์ฟิสเรียงทำมุม

นายกิตติราช สัจวิริยทรัพย์ 50010126

นายพิทักษ์ พร้อมไธสง 50011099

นายมรุต อุกฤษณ์โนรธ 50011221

รศ.ดรพญ์เจต พรหมวงส์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติของการถ่ายเทความร้อนในช่วงการไหลแบบลามินาร์
ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นออร์ฟิสและครีบริบด้วยเอียงทำมุม กำหนดให้ผิวท่อมีลักษณะ
แบบอุณหภูมิที่ผิวคงที่ โดยได้มีการติดตั้งแผ่นออร์ฟิสและครีบริบด้วยให้มีลักษณะการจัดวางเอียงทำ
มุมปะทะที่ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° โดยมีค่าอัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นออร์ฟิสต่อความสูงของ
ท่อ (Blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 ส่วนครีบริบด้วยมีค่าอัตราส่วนระหว่าง
ความสูงของแผ่นครีบริบต่อความสูงของท่อ (Blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.10, 0.20, 0.30 และ
0.40 โดยมีอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นครีบริบต่อความสูงของท่อ (Pitch ratio, PR) เท่ากับ 1
และ 1.5 ซึ่งการจำลองนี้ได้นำเสนอคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของของไหลสำหรับ
เลขเรย์โนลด์บนพื้นฐานเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่วงจาก $Re = 100$ ถึง
1200 และได้ศึกษาแผ่นออร์ฟิสและแผ่นครีบริบด้วยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสีย
ความดันในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผลลัพธ์ที่ได้จากท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดแผ่นออร์ฟิสและแผ่นครีบริบ
ด้วยถูกนำไปเปรียบเทียบกับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ โดยค่าการถ่ายเทความร้อน โดยแสดงใน
เทอมของเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) และการสูญเสียความดัน โดยแสดงในเทอมของตัวประกอบ
เสียดทาน (friction factor) พบว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดแผ่นออร์ฟิสและแผ่นครีบริบด้วยช่วย
เพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ และการเพิ่มขึ้นของ BR ทำให้ค่า
เลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น

Numerical Simulation of Laminar Heat Transfer in a Square Duct fitted with Angled Orifices

Kittirach Sujjawiriyasub

Pitak Promthaisong

Marut Ukritmanorot

Assoc.Prof. Dr.Pongjet Promvonge Advisor

ABSTRACT

Laminar periodic flow and heat transfer in a three dimensional square channel with isothermal walls and with $\alpha = 30^\circ$, 45° and 60° orifice baffle (Blockage ratio, BR) in range from 0.10, 0.15, 0.20 and 0.25 and U-shape ribs (Blockage ratio, BR) in range from 0.10, 0.20, 0.30 and 0.40 and (Pitch ratio, PR) of 1 and 1.5 is investigated numerically. The fluid flow and heat transfer characteristics are presented for Reynolds numbers based on the hydraulic diameter of the square channel ranging from 100 to 1200. Effects of orifice baffle and U-shape ribs on heat transfer and pressure loss in the square channel are studied. It is found that the orifice baffle and U-shape ribs perform better than the smooth square channel for all Reynolds number values. The increase of the BR leads to an increase in the Nusselt number and friction factor.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบลามินาร์ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้แผ่นกั้นวางเอียงสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยการให้คำปรึกษาและความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงอีกทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญาโท รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ดร.เอกพจน์ตันตราภรณ์ และ อาจารย์สยามสงวนรัมย์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมทำให้ปริญญาโทครั้งนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณวิฑาดา เกษภูวรัตน์ชัย และคุณสมบัติ ทำานา ที่ให้ความกรุณาในการสอนโปรแกรมและให้คำแนะนำที่ดีแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ทุนสนับสนุนการทำปริญญาโท ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และสถานที่สำหรับใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ร่วมสถาบันทุกท่านจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านที่ทำให้ปริญญาโทสำเร็จไปด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาโทฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ท่าน

นายกิตติราช สัจฉริยทรัพย์
นายพิทักษ์ พร้อมไธสง
นายมรุต อุกฤษณ์มโนรอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย	2
บทที่ 2 การถ่ายเทความร้อนและการไหลในท่อ	3
2.1 บทนำ	3
2.2 การไหลของของไหล	3
2.2.1 สถานะการไหล	3
2.2.2 ความเร็วเฉลี่ย	4
2.2.3 รูปร่างความเร็วของการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว	5
2.2.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทาน ในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว	7
2.3 การถ่ายเทความร้อน	8
2.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย	9
2.3.2 สถานะการปรับตัวเต็มที่แล้ว	10
2.4 การสมมูลของพลังงาน	13
2.4.1 กรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่	14
2.4.2 กรณีอุณหภูมิที่ผิวคงที่	15
2.5 สหพันธ์การพาความร้อนสำหรับท่อที่ไม่กลม	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6	สมรรถนะเชิงความร้อน	17
บทที่ 3	การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	18
3.1	บทนำ	18
3.2	ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข	18
3.3	ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	18
3.3.1	ขั้นก่อนประมวลผล	18
3.3.2	ขั้นประมวลผล	19
3.3.3	ขั้นแสดงผล	19
3.4	คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	20
3.4.1	ความเข้ากันได้	20
3.4.2	เสถียรภาพการคำนวณ	20
3.4.3	การลู่เข้าของผลเฉลย	20
3.4.4	การอนุรักษ์	20
3.4.5	ความจำกัดยอบ	21
3.4.6	ความเสมือนจริง	21
3.4.7	ความแน่นอน	21
3.5	รูปแบบการจัดวางกริด	22
บทที่ 4	การกำหนดปัญหาและตรวจสอบผลการคำนวณ	24
4.1	บทนำ	24
4.2	สมการควบคุมและสมมติฐาน	24
4.3	การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย	25
4.4	ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ	28
4.5	การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำตรง	29
บทที่ 5	ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย	31
5.1	บทนำ	31
5.2	แผ่นออริฟิส	31
5.2.1	อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส์	32
5.2.2	อิทธิพลของค่าอัตราส่วนการบล็อก	36
5.2.3	อิทธิพลของมุมปะทะ	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.4 อิทธิพลของค่าระยะห่างระหว่างแผ่นครีป	50
5.2.5 วิเคราะห์ผลข้อมูลทั้งหมดของแผ่นออร์ฟิส	57
5.3 แผ่นครีปรูปตัวยู	60
5.3.1 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส์	60
5.3.2 อิทธิพลของค่าอัตราส่วนการบดอัด	64
5.3.3 อิทธิพลของมุมปะทะ	71
5.3.4 อิทธิพลของค่าระยะห่างระหว่างแผ่นครีป	78
5.3.5 วิเคราะห์ผลข้อมูลทั้งหมดของแผ่นครีปรูปตัวยู	85
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	88
6.1 สรุปผลการศึกษา	88
6.2 ข้อเสนอแนะ	88
บรรณานุกรม	90



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่า Nu_D และ f สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ในท่อพื้นที่หน้าตัดต่างๆกัน	17
4.1 ลักษณะกรณีศึกษาของ Orifice	26
4.2 ลักษณะกรณีศึกษาของ U – Shape	27



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	3
2.2	5
2.3	8
2.4	8
2.5	12
2.6	13
3.1	19
3.2	21
3.3	22
3.4	22
4.1	25
4.2	26
4.3	29
4.4	30
5.1	33
5.2	34
5.3	35
5.4	37
5.5	38
5.6	39
5.7	40
5.8	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อติดแผ่นกั้นวางขวางที่ค่า BR ต่างๆ	42
5.10 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่มุมปะทะต่างๆ ที่ค่า $BR = 0.25$ และ $Re = 500$	44
5.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ค่าที่ค่า $BR = 0.25$ และ $Re = 500$ ในระนาบขวางการไหล	45
5.12 การกระจายตัวของเลขนัสเซลที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่มุมปะทะต่างๆ ที่ค่า $BR = 0.20$ และ $Re = 500$	46
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ	47
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ	48
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ ที่ $BR = 0.2$	49
5.16 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$, $Re = 500$ และ $BR = 0.25$	51
5.17 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ค่า PR ต่างๆ ที่ $\alpha = 45^\circ$, $Re = 500$ และ $BR = 0.25$ ในระนาบขวางการไหล	52
5.18 การกระจายตัวของเลขนัสเซลที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ค่า PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$, $Re = 500$ และ $BR = 0.25$	53
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ค่า PR ต่างๆ	54
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาที่ $PR = 1$ และ 1.5 ตามลำดับ ที่ค่า $BR = 0.25$ และมุม 45°	55
5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (η) กับเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาที่ $PR = 1$ และ 1.5 ตามลำดับ ที่ค่า $BR = 0.25$ และมุม 45°	56
5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะและค่า BR ต่างๆ โดยที่ $PR = 1$	57
5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะและค่า BR ต่างๆ โดยที่ $PR = 1$	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะและค่า BR ต่างๆ โดยที่ $PR = 1$	59
5.25 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดครีบริบตัวอยู่ที่ $BR = 0.20$ และมุม 45 องศา	61
5.26 การกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลภายในท่อกรณีติดแผ่นครีบริบตัวอยู่ที่ค่า $BR = 0.20$ และมุม 45 องศา ในระนาบขวางการไหล	62
5.27 การกระจายของเลขนัสเซิลที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นครีบริบตัวอยู่ที่ค่า $BR = 0.20$ และมุม 45 องศา	63
5.28 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดแผ่นกั้นวางขวางที่ $Re = 1000$	65
5.29 การกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลภายในท่อกรณีติดแผ่นครีบริบตัวอยู่ที่ค่า $Re=1000$ ในระนาบขวางการไหล	66
5.30 การกระจายของเลขนัสเซิลที่ผนังของท่อสี่เหลี่ยมกรณีติดแผ่นครีบริบตัวอยู่ที่ $Re = 1000$	67
5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อติดแผ่นครีบริบตัววางขวางที่ค่า BR ต่างๆ	68
5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อติดแผ่นกั้นวางขวางที่ค่า BR ต่างๆ	69
5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อติดแผ่นกั้นวางขวางที่ค่า BR ต่างๆ	70
5.34 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดแผ่นครีบริบตัวที่มุมปะทะต่างๆ ที่ค่า $BR = 0.20, Re = 500$	72
5.35 การกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลภายในท่อกรณีติดแผ่นครีบริบตัวอยู่ที่ค่า $Re=1000$ ในระนาบขวางการไหล	73
5.36 การกระจายของเลขนัสเซิลที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นครีบริบตัวที่มุมปะทะต่างๆ ที่ค่า $BR = 0.20, Re = 500$	74
5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ	75
5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ	76
5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ	77

ที่ $BR = 0.2$

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.40 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดแผ่นครีبدว้ยที่ PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$, $Re = 500$ และ $BR = 0.2$	79
5.41 การกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลภายในท่อกรณีติดแผ่นครีปรูปดว้ย ที่ค่า PR ต่างๆโดยที่ $\alpha = 45^\circ$, $Re = 500$ และ $BR = 0.2$ ในระนาบขวางการไหล	80
5.42 การกระจายของเลขนัสเชิลท์ที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นครีปรูปดว้ยที่ค่า PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$, $Re = 500$ และ $BR = 0.2$	81
5.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ค่า PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$ และ $BR = 0.2$	82
5.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ค่า PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$ และ $BR = 0.2$	83
5.45 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ค่า PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$ และ $BR = 0.2$	84
5.46 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะ และค่า BR ต่างๆ โดยที่ $PR = 1$	85
5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะ และค่า BR ต่างๆ โดยที่ $PR = 1$	86
5.48 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะ และค่า BR ต่างๆ โดยที่ $PR = 1$	87

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_c	พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2
A_s	พื้นที่ผิวท่อทั้งหมด, m^2
BR	อัตราส่วนการบดเคี้ยวไหล
b	ความสูงแผ่นกั้น, m
C	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, $J/kg \cdot K$
C_f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, $J/kg \cdot K$
C_v	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความปริมาตรคงที่, $J/kg \cdot K$
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์, m
E	พลังงาน, W
f	ตัวประกอบเสียดทาน
f_o	ตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2
H	ความสูงของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, m
h	เอนทาลปี, J/kg ; สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$
i	พลังงานความร้อนภายใน, J/kg
k	ค่าการนำความร้อน, $W/m \cdot K$
L	ความยาวของท่อ, m
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s
Nu	เลขนัสเซิลท์
Nu_o	เลขนัสเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ
P	เส้นรอบรูป, m
Pr	เลขพรานด์เทิล
p	ความดัน, N/m^2
q	อัตราการถ่ายเทความร้อน, W
q_s''	ฟลักซ์ความร้อนระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ, W/m^2
R	ค่าคงที่ของแก๊ส, $J/kg \cdot K$
Re	เลขเรย์โนลด์ส์
r	รัศมีท่อ, m

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

S	เทอมของการสร้างหรือสูญหาย
s	อัตราการเสียรูปร่างเชิงเส้นของชิ้นส่วนของไหล
T	อุณหภูมิ, K
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ย, K
T_s	อุณหภูมิผิว, K
t	เวลา, s
\mathbf{u}	เวกเตอร์ความเร็ว, m/s
u	ความเร็วในแนวแกน x , m/s
u_m	ความเร็วเฉลี่ย, m/s
v	ความเร็วในแนวแกน y , m/s ; ปริมาตรจำเพาะ, m^3/kg
w	ความเร็วในแนวแกน z , m/s
$X_{fd,h}$	ความยาวช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวของกรไหล, m
$X_{fd,t}$	ความยาวช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวของความร้อน, m
Φ	ฟังก์ชันการสลายตัว
α	ค่าการฟุ้งกระจายของความร้อน, m^2/s ; มุมปะทะของแผ่นกั้นกับกระแสการไหล, degree
ϕ	ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อ หน่วยมวล
η	สมรรถนะเชิงความร้อน
λ	ความหนืดที่สอง
μ	ความหนืดสัมบูรณ์, $N \cdot s/m^2$
Γ	การแพร่ทางความร้อน
ρ	ความหนาแน่น, kg/m^3
τ	ความเค้นเฉือนเนื่องจากความหนืด, N/m^2

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าความต้องการพลังงานมีมากขึ้นเนื่องจากโลกมีความเจริญก้าวหน้า รวมทั้งวงการอุตสาหกรรมได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วทำให้มีการใช้พลังงานในปริมาณที่สูงเพิ่มขึ้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์แบบหนึ่งที่สำคัญพบได้บ่อย ๆ ในทางวิศวกรรม หม้อน้ำ คอนเดนเซอร์ อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่น้ำ หม้อน้ำรถยนต์ คอยล์ร้อนหรือคอยล์เย็น ฯลฯ ต่างเป็นตัวอย่างของกระบวนการที่ความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น โดยไม่มีการผสมกันทางกายภาพเลย หลายประเทศพยายามที่จะหาวิธีเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อให้มากที่สุด ดังนั้นการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแผ่น ออร์ฟิสจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ที่ผ่านมาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ โดยการทำให้พื้นที่ผิวขรุขระหรือ ติดครีบบที่ผิวภายในท่อเพื่อให้เกิดเทอร์บูเลนซ์ ช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนปัญหาของ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ ต้องการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น จากปัญหาดังกล่าว ถ้าเราสามารถหาวิธีเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้นเป็นผลให้เพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หลักการเดิมเป็นการติดครีบบที่ผิวภายในท่อเป็นวิธีการในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแผ่นออร์ฟิสจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อการค้นคว้าวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1.2.1 ศึกษาและออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแผ่นออร์ฟิสและแผ่นครีบบรูปตัวยู

1.2.2 ศึกษาผลของลมไหลแบบตรงภายในท่อสี่เหลี่ยม

1.2.3 ศึกษาผลของรูปร่าง มุม ตำแหน่งของแผ่นออร์ฟิสและแผ่นครีบบรูปตัวยู ภายในท่อชุด ทดลองรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่จัดวางแผ่นออร์ฟิสและแผ่นครีบบรูปตัวยูในลักษณะต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method)

1.3.2 ทำการคำนวณในแบบจำลองการไหลสามมิติที่มีการไหลแบบลามินาร์ในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์จาก 100 ถึง 1200

1.3.3 พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)

1.3.4 ทำการวิจัยเฉพาะท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่สภาวะอุณหภูมิผิวคงที่เท่ากับ 310 K

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 รวบรวมข้อมูล ทำการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

1.4.2 กำหนดลักษณะของปัญหา และกำหนดลักษณะรูปร่างของแผ่นกั้นและสร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลพร้อมกับการเลือกขนาดและจำนวนกริดที่เหมาะสม

1.4.3 ตรวจสอบ โปรแกรมกับผลเฉลยแน่นอนตรง (Exact solution) ทำการคำนวณเชิงตัวเลขในปัญหาที่ต้องการศึกษา

1.4.4 ทำการคำนวณเชิงตัวเลขจกแบบจำลองการไหลสามมิติ ที่ต้องการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ระบุในวัตถุประสงค์ได้แก่ ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ รูปแบบของแผ่นกั้น มุมปะทะ และค่าอัตราส่วนการนำของแบบจำลองการไหล

1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณ นำข้อมูลจากการคำนวณมาทำการวิเคราะห์ผลและแสดงค่าในรูปพารามิเตอร์ไว้หน่วย

1.4.6 สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์และข้อเสนอแนะที่ควรทำการวิจัยต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ

1.5.2 พัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น

1.5.3 สามารถนำหลักการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่างๆ

บทที่ 2

การถ่ายเทความร้อนและการไหลในท่อ

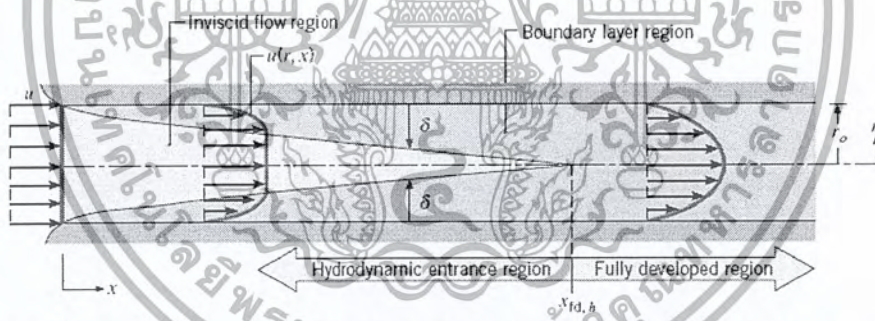
2.1 บทนำ

การไหลภายในท่อมืดข้อจำกัด คือความหนาของบาวนด์คาร์เลเยอร์ ไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เพราะถ้าเมื่อของไหลไหลไปได้ระยะหนึ่งบาวนด์คาร์เลเยอร์ก็จะก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อ รูปร่างของความเร็วจึงมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ช่วงที่ความหนาของบาวนด์คาร์เลเยอร์มีการเพิ่มขึ้นจะเรียกว่า การไหลที่กำลังปรับตัว (Developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region และเมื่อความหนาของบาวนด์คาร์เลเยอร์ก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อจะเรียกว่า การไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed flow)

2.2 การไหลของของไหล

2.2.1 สถานะการไหล

พิจารณาการไหลแบบลามินาร์ ในท่อกลมที่มีรัศมี r_0 ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การก่อตัวของบาวนด์คาร์เลเยอร์ของการไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม

สำหรับการไหลภายในท่อนั้น ต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (Entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นอย่างไร แบบลามินาร์ หรือเทอร์บูเลนต์ เลขเรย์โนลด์ส์สำหรับการไหลภายในท่อกลมกำหนดเป็น

$$Re_D \equiv \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (2.1)$$

ซึ่ง u_m เป็นความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ

D_h เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) ของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขเรย์โนลด์ส์วิกฤติ สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากลามินาร์เป็นเทอร์บูเลนต์
เริ่มต้นจาก

$$\text{Re}_{D,C} \approx 2300$$

และการไหลเป็นแบบเทอร์บูเลนต์เต็มที่ ที่ $\text{Re}_D \geq 4000$

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ (คือ $\text{Re}_D \leq 2300$) ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวหาได้จากสมการ

$$\left(\frac{x_{fd,h}}{D_h} \right)_{\text{mm}} \approx 0.05 \text{Re}_D \quad (2.2)$$

2.2.2 ความเร็วเฉลี่ย (Mean velocity)

ข้อแตกต่างของการไหลภายในและการไหลภายนอกก็คือ เราไม่สามารถใช้ความเร็วของกระแสนี้ u_c ของของไหลได้ เนื่องจากความเร็วภายในท่อจะแปรเปลี่ยนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังนั้นจึงใช้ความเร็วเฉลี่ย u_m (Mean velocity) แทน โดยนิยามว่าความเร็วเฉลี่ยนี้คือ ความเร็วที่เมื่อคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อและความหนาแน่นของของไหลแล้วจะเท่ากับอัตราการไหลของมวลซึ่งได้

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \quad (2.3)$$

ถ้าเป็นการไหลสภาวะคงที่ ที่อัดตัวไม่ได้แล้ว ภายในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ค่า \dot{m} และ u_m ย่อมมีค่าคงที่ตลอดความยาวท่อ

สำหรับท่อกลม ($A_c = \pi D^2 / 4$) ค่าของเลขเรย์โนลด์ส์ลดลงเป็น

$$\text{Re}_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (2.4)$$

เพราะว่า ค่า \dot{m} อาจหาได้จากการอินทิเกรตของฟลักซ์มวล (ρu) ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสำหรับท่อกลม กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ แล้วจะได้

$$u_m = \frac{\int_{A_c} \rho u(r,x) dA_c}{\rho A_c} = \frac{2\pi\rho}{\rho\pi r_o^2} \int_0^{r_o} u(r,x) r dr = \frac{2}{r_o^2} \int_0^{r_o} u(r,x) r dr \quad (2.6)$$

ซึ่งจะหาค่า u_m ได้ทันที เมื่อรู้ Velocity profile, $u(r)$ ที่ตำแหน่งนั้น

2.2.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

รูปทรงของความเร็วสามารถหาได้ สำหรับการไหลแบบลามินาร์ของของไหลที่คุณสมบัติคงที่ อัดตัวไม่ได้ ในช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้วของท่อกลม (สำหรับเทอร์บูเลนซ์ ส่วนใหญ่ต้องอาศัยผลจากการทดลองเป็นหลัก) โดยทั่วไปจะเป็นฟังก์ชันของรัศมี

สิ่งสำคัญสำหรับเงื่อนไขข้างต้นก็คือค่าความเร็วในแนวรัศมีและการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกนทุกๆแห่งมีค่าเป็นศูนย์

$$v = 0 \text{ และ } \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) = 0$$

ดังนั้น ความเร็วตามแนวแกนจะมีค่าขึ้นอยู่กับ r เท่านั้น $[u(x,r) = u(r)]$

ความเร็วตามแนวแกนหาได้ จากการแก้สมการที่เหมาะสมของสมการโมเมนตัม ตามแนว x หรืออาจจะหาโดยคิดสมดุลของการอนุรักษ์โมเมนตัมก็ได้ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สมดุลแรงบนอิลิเมนต์ dx สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ก่อตัวเต็มที่ในท่อกลม

สำหรับอิลิเมนต์ดิฟเฟอเรนเชียลรูปวงแหวนของรูปที่ 2.2 สามารถเขียนสมดุลของแรงได้ดังนี้

$$\tau_r (2\pi r dx) - \left\{ \tau_r (2\pi r dx) + \frac{d}{dr} [\tau_r (2\pi r dx)] dr \right\} + p(2\pi r dr) - \left\{ p(2\pi r dr) + \frac{d}{dx} [p(2\pi r dr)] dx \right\} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ซึ่งลดรูปเป็น } -\frac{d}{dr}(r\tau_r) = r \frac{dp}{dx} \quad (2.7)$$

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

$$\text{ดังนั้น (2.7) จะเป็น } \frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} \quad (2.8)$$

เพราะว่า $\frac{dp}{dx}$ นั้นไม่ขึ้นกับ r ดังนั้นเราสามารถอินทิเกรต (2.8) ได้

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

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

จากเงื่อนไขที่ขอบได้ว่า $u(r_0) = 0$ และ $\frac{du}{dr}|_{r=r_0} = 0$ จะได้

$$u(r) = -\frac{1}{4\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) r_0^2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (2.9)$$

ดังนั้น รูปทรงของความเร็วสำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะเป็น “พาราโบลาและจะสังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน $\left(\frac{dp}{dx} \right)$ ต้องเป็นลบเสมอ ผลลัพธ์ที่กล่าวมานี้อาจใช้หาความเร็วเฉลี่ยได้ (u_m) โดยแทนสมการ (2.9) ใน (2.6) แล้วทำการอินทิเกรตจะได้

$$u_m = -\frac{r_0^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} \quad (2.10)$$

แทนสมการ (2.10) ใน (2.9) จะได้รูปร่างของความเร็วเป็น

$$\frac{u(r)}{u_m} = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะว่า u_m สามารถหาได้จากความรู้อัตราการไหลของมวล ดังนั้นสมการ (2.10) สามารถหาเกร็ดเดียวของความดันได้ ($\frac{dp}{dx}$)

2.2.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว

วิศวกรส่วนใหญ่ให้ความสนใจเกี่ยวกับความดันตกคร่อมในการไหลของของไหลภายในท่อ เนื่องจากตัวพารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับการหาขนาดกำลังงานของปั๊มหรือพัดลมโดยตรง ในการหาความดันตกคร่อม เราจะใช้ ตัวประกอบเสียดทานของ Moody (หรือ Darcy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยนิยามว่า

$$f \equiv \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2 / 2} \quad (2.12)$$

ค่านี้ต่างกับสัมประสิทธิ์เสียดทาน C_f ซึ่งบางครั้งเรียกว่า “ตัวประกอบเสียดทานเฟอนิ่ง” ซึ่งนิยามว่า

$$C_f \equiv \frac{\tau_s}{\rho u_m^2 / 2} \quad (2.13)$$

เพราะว่าแรงเฉือนบนผิวของของไหลเท่ากับ (ทิศทางตรงกันข้าม) แรงบนผิวของของไหล ดังนั้นความเค้นเฉือนบนผิวกำหนดเป็น $\tau_s = -\mu(du/dr)_{r_s}$ จากสมการ (2.9) ได้

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (2.14)$$

แทนสมการ (2.1) และ (2.10) ลงใน (2.12) สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ได้

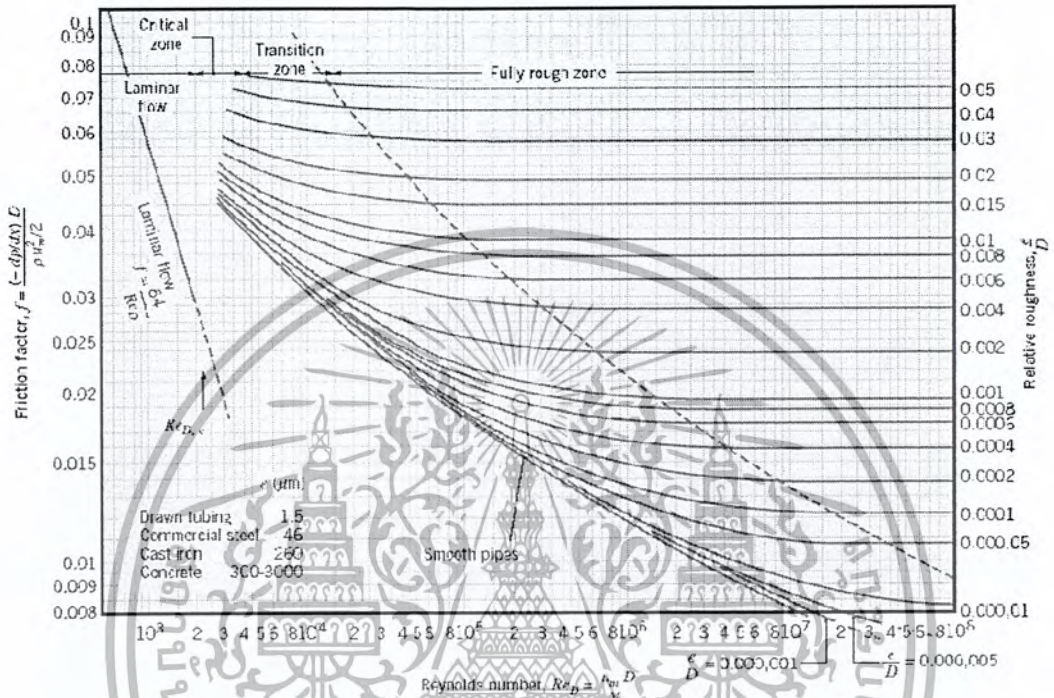
$$f = \frac{64}{\text{Re}_D} \quad (2.15)$$

นอกจากนี้ เรารู้ว่า ความดันตกคร่อม (Δp) ระหว่างระยะ x_1 ถึง x_2 เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

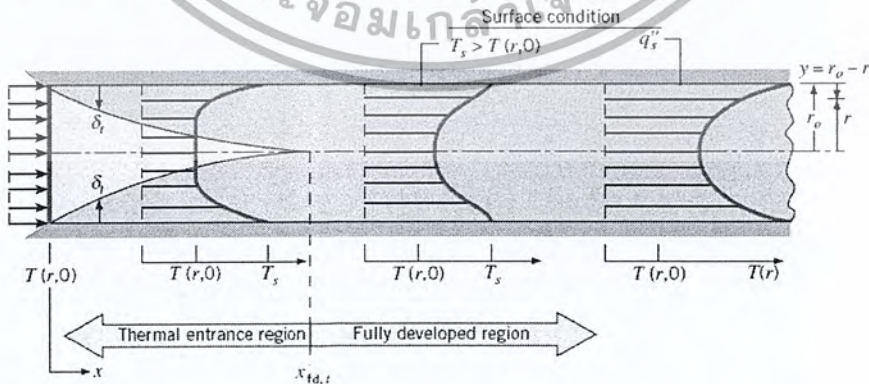
$$\Delta p = - \int_{p_1}^{p_2} dp = f \frac{\rho u_m^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx = f \frac{\rho u_m^2}{2D} (x_2 - x_1) \tag{2.16}$$

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ซึ่งค่า f หาได้จากรูปที่ 2.3 หรือจากสมการ (2.15)



รูปที่ 2.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม

2.3 การถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 2.4 การก่อตัวของบาวนด์รีเลเซอร์ทางความร้อนในท่อกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราพิจารณาอิทธิพลของความร้อนข้างล่างของไหลเข้าไปในท่อตามรูปที่ 2.4 ที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ $T(r, 0)$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและบาวน์คาร์ลีเลเยอร์ของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสถานะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอคงที่ ($T_s = \text{คงที่}$) หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ ($q_s'' = \text{คงที่}$) สถานะที่ปรับตัวคงที่แล้วของความร้อน (thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น ในที่สุดรูปร่างของอุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะแตกต่างกันตามเงื่อนไข ไม่ว่าจะกรณีอุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัว จะเป็น

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05 \text{ Re}_D \text{ Pr} \quad (2.17)$$

โดยการเปรียบเทียบบริเวณทางเข้า(Entrance region) ของอุณหภูมิตามสมการ (2.17) กับสมการของความเร็ว (2.2) จะพบว่าต่างกันที่ค่า Pr เท่านั้น จึงพอสรุปได้ว่า ถ้า $\text{Pr} > 1$ แล้ว ไฮโดรไดนามิกบาวน์คาร์ลีเลเยอร์ ขยายเร็วกว่า บาวน์คาร์ลีเลเยอร์ของความร้อนมาก ($x_{fd} > x_{fd,t}$) และจะกลับกันถ้า $\text{Pr} < 1$ สำหรับค่า Pr สูงๆ เช่น น้ำมัน ($\text{Pr} \geq 100$) x_{fd} จะน้อยกว่า $x_{fd,t}$ มากมายและอาจสมมุติได้ว่ารูปทรงของความเร็วที่ปรับตัวเต็มที่แล้วมีตลอดช่วงบริเวณทางเข้าของความร้อน ในทางกลับกันของไหลที่มีค่า Pr ต่ำๆ เช่น โลหะเหลว ($\text{Pr} \leq 0.05$) รูปร่างอุณหภูมิอาจเป็นแบบอัดตัวเต็มที่แล้วได้เร็วมากในขณะที่รูปร่างของความเร็วยังอยู่ในช่วงกำลังก่อตัวอยู่ ส่วนในการไหลแบบเทอร์บูเลนต์เงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระ ไม่ขึ้นกับ Pr และโดยการประมาณครั้งก่อนได้ว่า $x_{fd,t} / D = 10$

2.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย

ในเรื่องอุณหภูมินี้ จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) ในลักษณะที่เหมือนกัน u_m โดยให้ความหมาย

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho u c_v T dA_c}{\dot{m} c_v} \quad (2.18)$$

สำหรับท่อกลม และเป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ จะได้ว่า

$$T_m = \frac{2}{u_m r_o^2} \int_0^{r_o} u T r dr \quad (2.19)$$

ค่าของ T_m จะเปลี่ยนตามแนว x ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหล ซึ่งต่างจาก u_m ที่มีค่าคงที่สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

ฟลักซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (2.20)$$

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

2.3.2 สถานะการปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed conditions)

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหลคืออุณหภูมิของไหลต้องยังคงเปลี่ยนแปลงตามระยะ x สิ่งที่ต้องรู้คือเกิดภาวะ thermal fully developed หรือยัง สถานการณ์นี้จะแตกต่างไปจากกรณีการไหลของของไหลที่ซึ่ง $(\partial u / \partial x) = 0$ ในช่วงบริเวณปรับตัวเต็มที่แล้ว ในทางกลับกันถ้ามีการพาความร้อนแล้ว (dT_m/dx) เช่นเดียวกับ $(\partial T / \partial x)$ ที่รัศมี r ใดๆจะไม่เป็นศูนย์ ผลที่ตามมารูปร่างของอุณหภูมิ $T(r)$ จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ x ซึ่งเปรียบเสมือนว่า สถานะการปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิไม่เลยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิเพื่อให้ได้เงื่อนไขนี้

จากสำหรับการนำแบบทรานเซียนท์และสมการอนุพันธ์พลังงาน ได้ความแตกต่างอุณหภูมิไร้มิติในรูป $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอยู่จริงซึ่งอัตราส่วนนี้จะเป็นอิสระกับ x นั่นคือถึงแม้ว่า $T(r)$ ยังคงเปลี่ยนอย่างต่อเนื่องกับ x แต่รูปร่างสัมพัทธ์ของ Profile นี้จะไม่เปลี่ยนแปลงเลย และการไหลแบบนี้เรียกว่า “การไหลปรับตัวเต็มที่แล้วทางความร้อน” (thermally fully developed) และจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right]_{fd,t} = 0 \quad (2.21)$$

โดยที่ T_s เป็นอุณหภูมิผิวท่อ T เป็นอุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

T_m เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (2.21) ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่ออาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่หรือ T_s คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อที่ซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือ ผิวภายนอกที่ได้รับจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนกรณี T_s คงที่ จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสภาวะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

สังเกตว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะเกิดเงื่อนไขทั้งสองอย่างนี้พร้อมกัน (เกิดกรณี T_s และ q_s'' คงที่พร้อมกัน) ถ้า q_s'' คงที่ T_s ต้องแปรเปลี่ยนกับระยะ x

รูปแบบที่สำคัญจำนวนมากของการไหลที่ปรับตัวแล้วทางความร้อน (Thermally developed flow) มักอ้างถึงสมการ (2.21) เพราะว่าอัตราส่วนอุณหภูมินี้เป็นอิสระกับ x ค่าอนุพันธ์ของอัตราส่วนนี้เทียบกับ r ต้องไม่ขึ้นกับ x การหาค่าอนุพันธ์ที่ผิวท่อ (สังเกตว่า T_s และ T_m คงที่) เราจะได้

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

แทน $\partial T / \partial r$ จากกฎของฟูเรียร์ ซึ่ง จากรูป 2.3 อยู่ในรูป

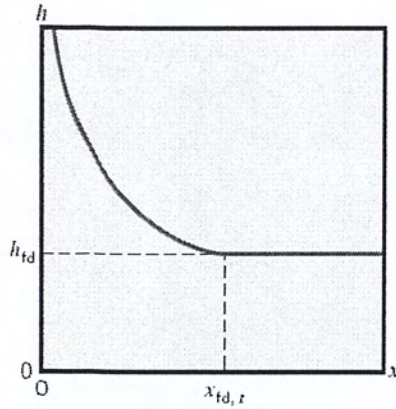
$$q_s'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0}$$

และสำหรับ q_s'' จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน จะได้

$$\frac{h}{k} \neq f(x) \quad (2.22)$$

ดังนั้นการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิของของไหล โดยมีคุณสมบัติต่างๆคงที่ ค่า h ที่ตำแหน่งใดๆจะคงที่ไม่ขึ้นกับระยะ x

สมการ(2.21) ใช้ไม่ได้กับช่วงระยะทางเข้า (entrance region) ที่ซึ่ง h แปรตาม x ตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 เพราะว่า $\delta_f = 0$ ที่ทางเข้าของท่อดังนั้น h จะมีค่าสูงมากที่ $x = 0$ อย่างไรก็ตามค่า h จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดบาวนด์คาร์เลเยอร์ของอุณหภูมิขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งก็คือเข้าสู่ช่วงปรับตัวเต็มที่แล้วนั่นเอง



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงตามแกน h สำหรับการไหลภายในท่อ

กรณีพิเศษ สำหรับฟลักซ์ความร้อน (q_s'') คงที่ เพราะว่าทั้งค่า h และ q_s'' คงที่ ในช่วงปรับตัวเต็มที่แล้ว จากสมการ (2.20) ได้ว่า

$$\left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{fd,t} = \left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{fd,t} \quad q_s'' = \text{constant} \quad (2.23)$$

ถ้ากระจาย (2.21) และหาคำตอบสำหรับ $\partial T / \partial x$ จะได้

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{fd,t} = \left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{fd,t} - \frac{(T_s - T)dT_s}{(T_s - T_m)dx} \Big|_{fd,t} + \frac{(T_s - T)dT_m}{(T_s - T_m)dx} \Big|_{fd,t} \quad (2.24)$$

แทนค่าจากสมการ (2.23) ได้

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{fd,t} = \left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{fd,t} \quad q_s'' = \text{constant} \quad (2.25)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวแกนจะเป็นอิสระกับตำแหน่งในแนวรัศมี สำหรับกรณีของ T_s คงที่ ($dT_s / dx = 0$) จากสมการ (2.24) ได้ว่า

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{fd,t} = \frac{(T_s - T)dT_m}{(T_s - T_m)dx} \Big|_{fd,t} \quad T_s = \text{constant} \quad (2.26)$$

โดยที่ค่า $\partial T / \partial x$ จะขึ้นอยู่กับแนวรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาพอเชื่อถือได้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยเป็นตัวแปรที่สำคัญมากสำหรับการไหลภายในท่อ เพื่อที่จะอธิบายการไหลนั้นๆ จำเป็นต้องรู้การแปรเปลี่ยนของมันกับค่า x ซึ่งการแปรเปลี่ยนหาได้ โดยการประยุกต์การสมดุลพลังงานทั้งหมดกับการไหล

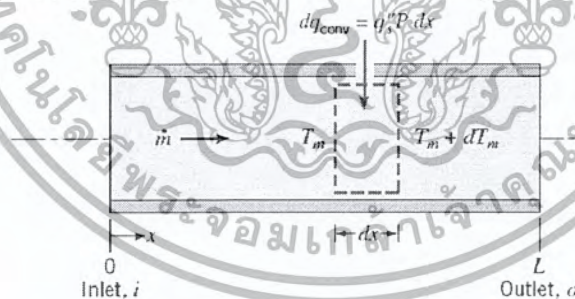
2.4 การสมดุลของพลังงาน (Energy Balance)

พิจารณาการไหลในท่อตามรูปที่ 2.6 ของไหลไหลด้วยอัตรามวลคงที่ \dot{m} และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของของไหลรวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางแนวแกนจะไม่นำมาคิด ดังนั้นถ้าไม่มีงานเพลลาซึ่งกระทำโดยของไหลขณะไหลผ่านท่อแล้ว จะมีเพียงอิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน และกับงานจากการไหลเท่านั้น

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

โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 4.6 และจากนิยามของ T_m จะได้

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



รูปที่ 2.6 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ

หรือ
$$dq_{conv} = \dot{m} d(c_v T_m + pv) \quad (2.27)$$

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

$$dq_{conv} = \dot{m} dc_p T_m \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

รูปพิเศษของสมการ (2.28) เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขสำหรับท่อทั้งหมด โดยการอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อ จะได้

$$dq_{conv} = \dot{m}c_p(T_{m,o} + T_{m,i}) \quad (2.29)$$

โดยที่ q_{conv} เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด

สมการ (2.28) อาจเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่สะดวกได้โดยใช้สมการอัตราการพาความร้อนต่อปริมาตรควบคุมคือ $dq_{conv} = q_s'' P dx$ ซึ่ง P เป็นเส้นรอบรูป ($P = \pi D$) สำหรับท่อกลม โดยการแทนค่าจากสมการ (2.20) ได้ว่า

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m}c_p} = \frac{P}{\dot{m}c_p} h(T_s - T_m) \quad (2.30)$$

คำตอบของ (2.30) สำหรับค่า $T_m(x)$ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความร้อนที่ผิว คืออาจจะเป็นกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ หรืออุณหภูมิที่ผิวคงที่ก็ได้

2.4.1 กรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constance Surface Heat Flux)

กรณีนี้จะพบว่าง่ายที่จะหาค่า q_{conv} ทั้งหมด เพราะว่า q_s'' ไม่ขึ้นกับ x ดังนั้น

$$dq_{conv} = q_s''(PL) \quad (2.31)$$

สมการนี้อาจจะใช้กับสมการ (2.29) เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ($T_{m,o} + T_{m,i}$)

สำหรับ q_s'' คงที่ จากสมการ (2.30) จะได้

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m}c_p} = f(x) \quad (2.32)$$

อินทิเกรตจาก $x = 0$ ถึง x ใดๆได้

$$T_m(x) = T_{m,i} + \frac{q_s'' P}{\dot{m}c_p} x \quad q_s'' = \text{Constant} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จาก (2.33) ได้ว่า T_m แปรเปลี่ยนเชิงเส้นกับระยะ x ตามท่อ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 กรณีอุณหภูมิที่ผิวคงที่ (Constant Surface Temperature)

ผลลัพธ์สำหรับค่า q_{conv} และการกระจายของ T_m แตกต่างกัน โดยสิ้นเชิงจากกรณีก่อนสำหรับกรณีนี้โดยนิยาม โดย ΔT เป็น $T_s - T_m$ สมการ (2.30) เขียนใหม่เป็น

$$\frac{dT_m}{dx} = -\frac{d(\Delta T)}{dx} = \frac{P}{mc_p} h \Delta T$$

แยกตัวแปรและอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อได้

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

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

จากนิยามของ \bar{h} จะได้

$$\ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = -\frac{PL}{mc_p} \bar{h}_L \quad (T_s = \text{constant}) \quad (2.34a)$$

ซึ่ง \bar{h}_L หรือ \bar{h} เป็นค่าเฉลี่ยของ h สำหรับท่อทั่วทั้งหมด โดยจัดใหม่

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = \frac{T_s - T_{m,o}}{T_s - T_{m,i}} = \exp \left(-\frac{PL}{mc_p} \bar{h}_L \right) \quad (T_s = \text{constant}) \quad (2.34b)$$

ถ้าเราอินทิเกรตจากทางเข้าถึงตำแหน่ง x ใด จะได้

$$\frac{T_s - T_m(x)}{T_s - T_{m,i}} = \exp \left(-\frac{Px}{mc_p} \bar{h} \right) \quad (2.35)$$

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

การหาสมการสำหรับ q_{conv} ทั้งหมดนั้นยุ่งยากมาก กับธรรมชาติของเอกซ์โพเนนเชียล โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสาร (2.29) วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

และแทนค่า $\dot{m}c_p$ จากสมการ (2.34a) จะได้

$$q_{conv} = \bar{h}A_s\Delta T_{l,m} \quad (T_s = \text{constant}) \quad (2.36)$$

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

$$\Delta T_{l,m} \equiv \frac{\Delta T_o - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_o / \Delta T_i)} \quad (2.37)$$

สมการ (2.36) เป็นรูปหนึ่งของกฎการเย็นตัวของนิวตันสำหรับท่อทั้งหมดและ $\Delta T_{l,m}$ เป็นค่าเฉลี่ยของความแตกต่างอุณหภูมิที่เหมาะสมทั่วทั้งความยาวท่อ ธรรมชาติลอการิทึมของความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยนี้เนื่องจากธรรมชาติของการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล [แตกต่างจากความแตกต่างเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean Temperature Difference, AMTD) ซึ่งมีรูป $\Delta T_{am} = (\Delta T_i + \Delta T_o) / 2$]

2.5 สหพันธ์การพาความร้อนสำหรับท่อที่ไม่กลม

ถึงแม้ว่าเรามีข้อจำกัดมากเกี่ยวกับการพิจารณาต่อการไหลภายในท่อกลม การประยุกต์ทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จำนวนมากเกี่ยวข้องกับการพาความร้อนในท่อที่ไม่กลม สมการที่กล่าวมาแล้วใช้ได้ดีพอประมาณกับท่อที่ไม่มีพื้นที่หน้าตัดกลม โดยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลเป็นความยาวเฉพาะ (Characteristic length) ซึ่งเรียกว่า “เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก” (Hydraulic diameter) และนิยามเป็น






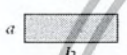
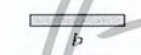
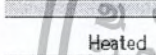
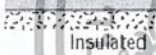

$$D_h \equiv \frac{4A_c}{P} \quad (2.38)$$

ที่ซึ่ง A_c และ P เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของการไหลตามลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลางนี้จะใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น Re_D และ Nu_D

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ สหพันธ์ที่ใช้ในท่อกลมเมื่อนำมาใช้กรณีนี้อาจให้ความแม่นยำน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพื้นที่หน้าตัดที่มีมุมคมหลายมุม สำหรับกรณีเช่นนั้น ค่า Nu_D สอดคล้องกับเงื่อนไขปรับตัวเต็มที่แล้วหาได้จากตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่า Nu_D และ f สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อพื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ กัน

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

Used with permission from W. M. Kays and M. E. Crawford, *Convective Heat and Mass Transfer*, 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 1993.

2.6 สมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Performance)

สมรรถนะเชิงความร้อนหาได้จาก

$$\eta = \frac{(Nu / Nu_o)}{(f / f_o)^{1/3}} \quad (2.39)$$

เมื่อ η คือ สมรรถนะเชิงความร้อน

Nu คือ เลขนัสเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดแผ่นกัน

Nu_o คือ เลขนัสเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ

f คือ ตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดแผ่นกัน

f_o คือ ตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ

บทที่ 3

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

3.1 บทนำ

การจำลองการถ่ายเทความร้อนและสภาวะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นกั้นแบบต่างๆ นอกจากความเข้าใจทางทฤษฎีพื้นฐาน ยังต้องมีความเข้าใจทางด้านกรคำนวณเชิงตัวเลขเนื่องจากเป็นเครื่องมือหลักสำหรับการหาผลเฉลย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ หัวข้อ 3.2 กล่าวถึงประวัติ และพัฒนาการโดยย่อของวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข หัวข้อ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นแนวทางสากลที่ใช้โดยทั่วไป หัวข้อ 3.4 อธิบายคุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ความผิดพลาดของสมการดิฟเฟอเรนเชียล หัวข้อที่ 3.5 กล่าวถึงรูปแบบการจัดวางกริด และสอดคล้องความหมายของตัวแปร และสัญลักษณ์ที่ใช้ในบทนี้

3.2 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

วิวัฒนาการของการคำนวณเชิงตัวเลขเริ่มมาาก่อนปี ค.ศ. 1950 เกิดขึ้นพร้อมกับยุคที่ระบบคอมพิวเตอร์เริ่มมีการพัฒนา ช่วงเวลานั้นระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference methods, FDM) และระเบียบวิธีผลต่างมูลฐาน (Finite element methods, FEM) เป็นวิธีพื้นฐานในการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations, PDE) ซึ่งนิยมใช้มากในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics, CFD) ต่อมาได้รวบรวมเอาองค์ความรู้ทางระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีผลต่างมูลฐานเข้าไว้ด้วยกัน เรียกว่า ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume methods, FVM) ทำให้มีโครงสร้างที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น ขณะที่ยังมีความแม่นยำสูง จนเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

3.3 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

หากพิจารณาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในมุมมองการโปรแกรม จะกล่าวได้ว่าเป็นโครงสร้างของอัลกอริทึมที่สามารถนำไปสู่การจำลองสภาวะการไหลได้ โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในเชิงพาณิชย์ ส่วนมากมีระบบที่ให้ผู้ใช้งานป้อนค่าต่างๆที่ต้องการแล้วจึงนำไปคำนวณ โดยแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนประมวลผล

ขั้นตอนประมวลผล (Pre-processing) คือขั้นตอนเตรียมการ โดยระบุรายละเอียดของการ

เอกสารนี้เกี่ยวข้องกับปัญหา และพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้ ท่านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กำหนดรูปร่าง และระบุนขนาดของระบบที่สนใจ เรียกว่า การกำหนดสนามการคำนวณ (Computation domain)
2. กำหนดจำนวน และรูปแบบการจัดวางกริด (Grid or Mesh) ซึ่งคือการแบ่งสนามการคำนวณออกเป็นปริมาตรเล็กๆ รูปแบบการจัดแบ่ง และจัดวางกริด ขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณาการจัดที่เหมาะสมทำให้การหาผลเฉลยประมาณค่า (Approximation solution) แม่นยำขึ้น
3. เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับธรรมชาติของปัญหา เลือกโดยใช้อาศัยความรู้ทางทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง
4. กำหนดคุณสมบัติของไหล เช่นพิจารณาของไหลเป็นอากาศที่อุณหภูมิปกติ เป็นต้น
5. กำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) และค่าเริ่มต้น (Initial condition)



รูปที่ 3.1 ความเชื่อมโยงของกระบวนการดิสครีทไทต์และผลเฉลยประมาณค่า

3.3.2 ขั้นตอนประมวลผล

ขั้นตอนประมวลผล (Solving) เป็นขั้นที่ต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งการคำนวณในงานวิจัยนี้ทั้งหมดใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยมีขั้นตอนดังนี้ (จากรูปที่ 3.1)

3.3.2.1 ประมาณตัวแปรไม่ทราบค่าโดยหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน (มักใช้ในปัญหาแบบปั่นป่วน) สร้างเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย โดยรวมกับสมการควบคุมการไหล

3.3.2.2 หาผลเฉลยวิค (Weak solution) ของสมการควบคุมด้วยวิธีน้ำหนักตกค้าง (Weight residual) จากนั้นดิสครีทไทต์ โดยประมาณแต่ละเทอมความสัมพันธ์ด้วยแบบแผนวิธีที่เลือกไว้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นสมการพีชคณิต

3.3.2.3 แก้สมการพีชคณิต ผลเฉลยที่ได้เรียกว่า ผลเฉลยประมาณค่า

3.3.3 ขั้นตอนแสดงผล

ขั้นแสดงผล (Post-processing) คือการแสดงผลเฉลยประมาณค่าของตัวแปรที่สนใจ และใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ เช่น รูปแบบความเร็ว รูปแบบวอลเทจซิติ เป็นต้น

3.4 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติ ควรตระหนักว่าธรรมชาติมักมีพฤติกรรมซับซ้อน ดังนั้นสิ่งที่พึงระวังอย่างยิ่งคือ ความถูกต้องของผลเฉลย ผลการคำนวณที่ดีเลิศ เป็นเพียงค่าประมาณที่ดีที่สุดเท่าที่มนุษย์สามารถหาคำตอบได้เท่านั้น ไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำ

คุณสมบัติของวิธีการคำนวณ คือปัจจัยบ่งบอกความเที่ยงตรงของผลเฉลยประมาณค่า เมื่อเทียบกับพฤติกรรมจริงที่ควรเกิดขึ้น แบ่งได้หลายประการดังนี้

3.4.1 ความเข้ากันได้

ความเข้ากันได้ (Consistency) หมายถึงความเหมือน (Equivalent) ระหว่างสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย) และสมการที่ชดเชยที่ผ่านกระบวนการดิสcretize ไรต์ เมื่อระยะกริด (Grid spacing) และ หรือค่าขั้นเวลา (Time step) ลดลงใกล้ศูนย์ โดยปกติเรียกความแตกต่างหลังจากกระบวนการดิสcretize ไรต์ว่า ความผิดพลาดแบบทรานเคชัน (Truncation error) ซึ่งลดลงเมื่อมีความเข้ากันได้มากขึ้น

3.4.2 เสถียรภาพการคำนวณ

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

3.4.3 การลู่เข้าของผลเฉลย

ผลการคำนวณที่มีการลู่เข้าของผลเฉลย (Convergence) หมายถึงผลเฉลยประมาณค่ามีแนวโน้มเข้าใกล้ผลเฉลยแม่นยำ สำหรับปัญหาไม่เชิงเส้น (Nonlinear problem) ยกที่จะตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลย เนื่องจากไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำได้ อย่างไรก็ตามการตรวจสอบทำได้ด้วยวิธีเปรียบเทียบผลการคำนวณที่มีระยะกริดลดลง กระทั่งผลเฉลยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะกริด (Grid independent) เรียกได้ว่ามีคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลยที่ดี

3.4.4 การอนุรักษ์

คุณสมบัติการอนุรักษ์ (Conservation) เป็นคุณสมบัติที่มีอยู่ในกฎการอนุรักษ์ เนื่องจากผลการคำนวณมีที่มาจากสมการควบคุม ดังนั้นวิธีการคำนวณจึงควรมีคุณสมบัตินี้ด้วย โดยคุณสมบัติการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุรักษ์เป็นจุดเด่นที่สำคัญของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม กล่าวคือคำนึงถึงความสมดุลของการส่งถ่ายปริมาณข้ามขอบเขตที่พิจารณา เช่นรอบผิวปิดของปริมาตรเล็กๆที่แบ่งตามระยะกริดเป็นต้น

3.4.5 ความจำกัดขอบ

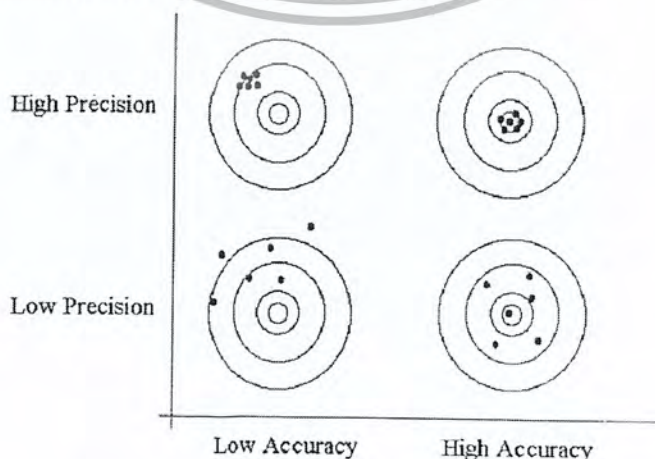
ความจำกัดขอบ (Bounded ness) หมายถึงผลเฉลยควรมีค่าอยู่ในขอบเขตจำกัด เช่นความหนาแน่น ความเข้มข้น ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ หรือระบบการถ่ายเทความร้อนที่ทราบอุณหภูมิต่ำสุด-สูงสุด ผลเฉลยที่ควรได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วงนั้นด้วยเช่นกัน โดยวิธีการคำนวณที่มีอันดับสูง (Higher order) มีแนวโน้มความจำกัดขอบต่ำลง ดังนั้นจึงไม่ควรเลือกใช้วิธีการคำนวณที่มีอันดับสูงมากเกินไปจนเกินความจำเป็น

3.4.6 ความเสมือนจริง

ความเสมือนจริง (Realizability) หมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่จำลองพฤติกรรมธรรมชาติที่ซับซ้อน เช่นแบบจำลองการไหลปั่นป่วน แบบจำลองการเผาไหม้ เป็นต้น ควรเลือกแบบจำลองที่มีความเสมือนจริงเมื่อเทียบกับความหมายทางกายภาพ หากเลือกใช้ หรือนำมาใช้ไม่สอดคล้องกับปัญหา ผลเฉลยที่ได้อาจไม่สื่อความหมายทางกายภาพที่ถูกต้อง

3.4.7 ความแม่นยำ

บ่อยครั้งในงานทางวิศวกรรมกล่าวถึงความแม่นยำ (Accuracy) ซึ่งมักใช้สับสนกับความแม่นยำ (Precision) พิจารณารูปที่ 3.2 แสดงความแตกต่างระหว่างแนวคิดทั้งสองอย่างชัดเจน ตรงกลางเป้าเป็นเสมือนศูนย์กลางแม่นยำ โดยเห็นได้ว่าความแม่นยำสูง หมายถึงค่าโดยเฉลี่ยไม่ต่างจากค่าแม่นยำ และความแม่นยำสูง หมายถึงค่าส่วนใหญ่กระจายตัวน้อย ดังนั้นงานวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมจึงควรให้ความสำคัญของความแม่นยำ มากกว่าความแม่นยำ ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์ได้ถูกต้อง มีแนวโน้มเดียวกับสภาพความจริงมากขึ้น แต่ในงานออกแบบต้องการความผิดพลาดลดน้อยสุด จึงควรใช้ทั้ง 2 แนวคิดประกอบรวมกัน



รูปที่ 3.2 แนวคิดของความแม่นยำและความแม่นยำ

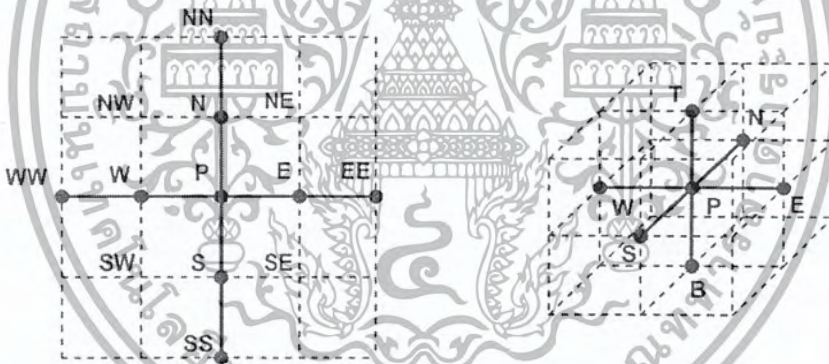
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล แบ่งปัจจัยของความแน่นอนได้เป็น 3 ปัจจัยดังนี้

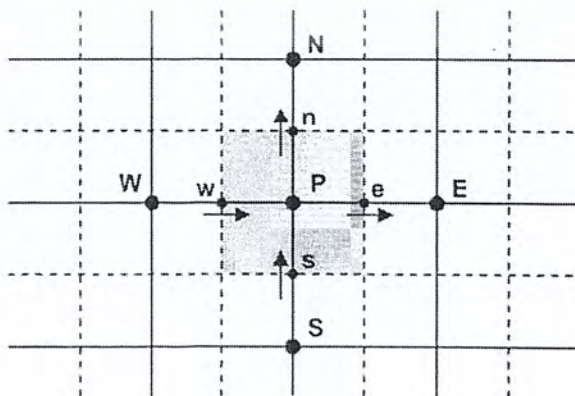
1. ความแน่นอนจากแบบจำลอง (Modeling accuracy) เกิดจากความเหมือนจริงของแบบจำลอง เทียบกับพฤติกรรมจริงธรรมชาติ
2. ความแน่นอนจากการ discretization (Discretization accuracy) เกิดจากความเข้ากันได้ของสมการพีชคณิต เทียบกับสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย)
3. ความแน่นอนจากการแก้สมการพีชคณิต (Iteration accuracy) เกิดจากการลู่ออกของ ผลเฉลยประมาณค่า เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการพีชคณิต

3.5 รูปแบบการจัดวางกริด

รูปแบบการจัดวางกริดโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ แบบโครงสร้างปกติ (Structured grids) แบบกลุ่มโครงสร้าง (Block structured grid) และแบบไม่เป็นโครงสร้าง (Unstructured grids) เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจกระบวนการ discretization ในหัวข้อถัดไป จึงได้ใช้รูปแบบการจัดวางกริดดังรูปที่ 3.3 (แบบโครงสร้างปกติ) และเพื่อความกระชับได้ discretization 2 มิติเท่านั้น ซึ่งสามารถขยายไปสู่กริดแบบ 3 มิติได้โดยตรง



รูปที่ 3.3 รูปแบบการจัดวางกริดในแกน 2 มิติ และ 3 มิติ



รูปที่ 3.4 ส่วนแรเงาแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อประเทศไทย ซึ่งสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.4 ตำแหน่ง P คือตำแหน่งโนด (Node) ที่สนใจ ตัวอักษรพิมพ์เล็ก เช่น w, e แสดงถึงตำแหน่งของปริมาณที่เข้า-ออกจากปริมาตรควบคุมที่เรเงา (Cell volume) เช่น ความเร็ว เป็นต้น เรียกว่า ตำแหน่งผิวเซลล์ (Cell face) ลูกศรที่ปรากฏแสดงทิศเป็นบวกของปริมาณเวกเตอร์ที่ตำแหน่งผิวเซลล์ รูปแบบลักษณะนี้ เรียกว่า การจัดเรียงแบบตำแหน่งร่วม (Co-located arrangement) กล่าวคือ ปริมาณสเกลาร์ และเวกเตอร์มีตำแหน่งเดียวกัน (มวล ความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิ)



บทที่ 4

การกำหนดปัญหาและตรวจสอบผลการคำนวณ

4.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้สำหรับทำการวิจัยและพร้อมทั้งทำการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ซึ่งลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนนี้เป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดแผ่นออร์ฟิสวางเอียงโดยทำมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ และอิทธิพลของความสูงของแผ่นออร์ฟิสซึ่งจะอธิบายในรูปของอัตราส่วนการบดบัง (Blockage ratio, BR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 ตามลำดับ และท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดแผ่นครึ่งรูปตัวยูโดยทำมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ และอิทธิพลของความสูงของแผ่นครึ่งรูปตัวยูซึ่งจะอธิบายในรูปของอัตราส่วนการบดบัง (Blockage ratio, BR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.10, 0.20, 0.30 และ 0.40 ตามลำดับ

4.2 สมการควบคุมและสมมติฐาน

การพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ได้มีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- การไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- การไหลเป็นแบบลามินาร์และอัดตัวไม่ได้
- คุณสมบัติของของไหลคงที่
- ไม่คำนึงแรงเนื่องจากน้ำหนักและการสูญเสียเนื่องจากความหนืด
- ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน

จากสมมติฐานข้างต้น สำหรับการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส สมการควบคุมประกอบไปด้วย สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน สามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังนี้

$$\text{สมการความต่อเนื่อง: } \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (4.1)$$

$$\text{สมการ โมเมนตัม: } \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{สมการพลังงาน: } \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (4.3)$$

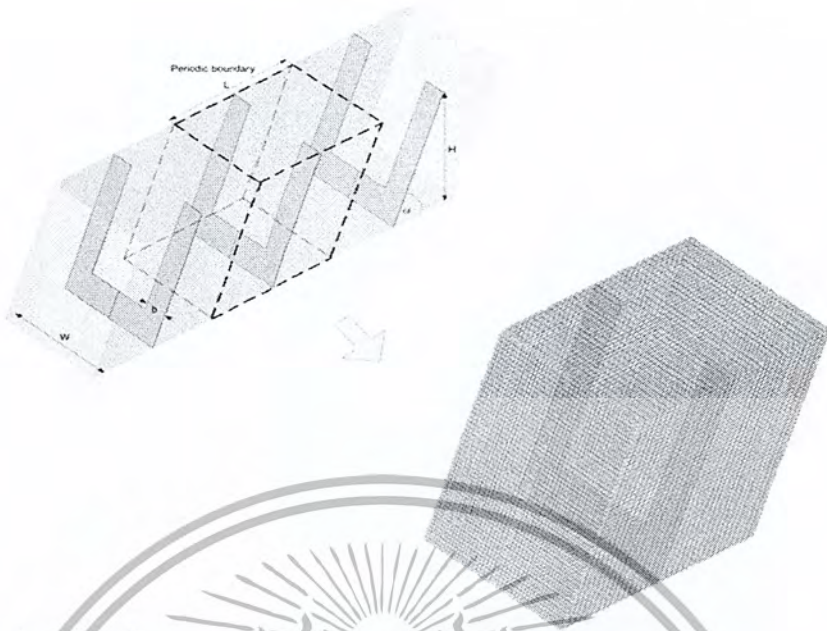
เมื่อ Γ คือการแพร่ทางความร้อน กำหนดโดย $\Gamma = \mu/\text{Pr}$

4.3 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ระบบที่ให้ความสนใจเป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสติดแผ่นออริฟิสภายในท่อ โดยติดแผ่นออริฟิสวางเอียงทำมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ตามลำดับ ขนาดรูของแผ่นออริฟิสมีค่า $BR = 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับ ระยะความห่างของแผ่นออริฟิสแต่ละแผ่น $PR = 1$ และ $PR = 1.5$ นอกจากแผ่นออริฟิสวางเอียงที่มุมปะทะต่างๆแล้วยังมีแผ่นกั้นรูปตัวยูวางเอียงทำมุม $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่า $BR = 0.10, 0.20, 0.30$ และ 0.4 ตามลำดับ ระยะความห่างของแผ่นกั้นรูปตัวยูวางเอียงแต่ละแผ่น $PR = 1$ และ $PR = 1.5$ ขนาดความสูงของท่อหน้าตัดจัตุรัสที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า $H = 0.05 \text{ m}$ และสมมติที่อยาวมก ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นแบบ periodic ที่ทางเข้าและทางออก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ในกรณีศึกษาต่างๆได้แสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองการไหลสามมิติของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีแผ่นออริฟิส



รูปที่ 4.2 แบบจำลองการไหลสามมิติของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีแผ่นกรับรูปตัวยู

กริดที่ใช้สำหรับกรณีแผ่นออริฟิสวิงเอียงและแผ่นกั้นรูปตัวยูวางเอียง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นแบบสี่เหลี่ยม แบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) คือจะพิจารณาบริเวณที่ติดผนังให้มีจำนวนกริดหนาแน่นและบริเวณที่ห่างออกไปจากผนังก็มีจำนวนกริดเบาบางลง ส่วนการหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบได้ทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณของกริดที่แตกต่างกัน ที่จำนวน 80,000 และ 120,000 ใช้ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE และใช้แบบแผนวิธีผลต่างอันดับหนึ่ง เงื่อนไขการรู้เข้าหาค่าตอบของทุกค่าอยู่ที่ 10^{-5} ยกเว้นสมการพลังงานซึ่งอยู่ที่ 10^{-9} พบว่าเมื่อจำนวนกริดเพิ่มขึ้นเป็น 120,000 ค่าเลขนัยเชิงทศนิยมที่ความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง 1.6 % ส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานมีความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง 1.0 % ซึ่งทั้งค่าเลขนัยเชิงทศนิยมและค่าตัวประกอบเสียดทานมีความสอดคล้องกันดีกับผลเฉลยแม่นยำตรง ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของกริดที่ 80,000 ซึ่งปริมาณกริดนี้จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 4.1 ลักษณะกรณีศึกษาของ Orifice

Case	Type	PR	Degree	DR
1	Orifice	1	30	0.10
2				0.15
3				0.20
4				0.25
5			45	0.10
6				0.15
7				0.20
8				0.25
9			60	0.10
10				0.15
11				0.20
12				0.25
13			30	0.10
14				0.15
15				0.20
16				0.25
17			45	0.10
18				0.15
19				0.20
20				0.25
21			60	0.10
22				0.15
23				0.20
24				0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ลักษณะกรณีศึกษาของ U - Shape

Case	Type	PR	Degree	DR	
1	U-Shape Rib	1	30	0.10	
2				0.20	
3				0.30	
4				0.40	
5			45	0.10	
6				0.20	
7				0.30	
8				0.40	
9			60	0.10	
10				0.20	
11				0.30	
12				0.40	
13			30	1.5	0.10
14					0.20
15					0.30
16					0.40
17			45	0.10	
18				0.20	
19				0.30	
20				0.40	
21			60	0.10	
22				0.20	
23				0.30	
24				0.40	

4.4 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

สำหรับการคำนวณในสามมิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

4.4.1 สภาวะทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translation อากาศไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลอย่างสม่ำเสมอ และมีค่าเลขพรานด์เทิลด์ (Prandtl number; Pr) คงที่เท่ากับ 0.707

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

4.4.3 กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนของแผ่นออริฟิสและแผ่นครีบริปตัวข้อมีค่าเท่ากับศูนย์ (แผ่นออริฟิสและแผ่นครีบริปตัวข้อมีเป็นฉนวน)

4.4.4 กำหนดให้ที่ผนังทุกด้านของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีอุณหภูมิผิวคงที่ 310 K

4.5 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution)

เนื่องจากผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นค่าที่ได้จากการประมาณ การคำนวณย่อมมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ดังนั้นในการนำโปรแกรมมาใช้งานต้องมีการตรวจสอบโปรแกรมว่าให้ผลเฉลยถูกต้องหรือไม่ การตรวจสอบโปรแกรมในหัวข้อนี้จะนำผลที่ได้จากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรง

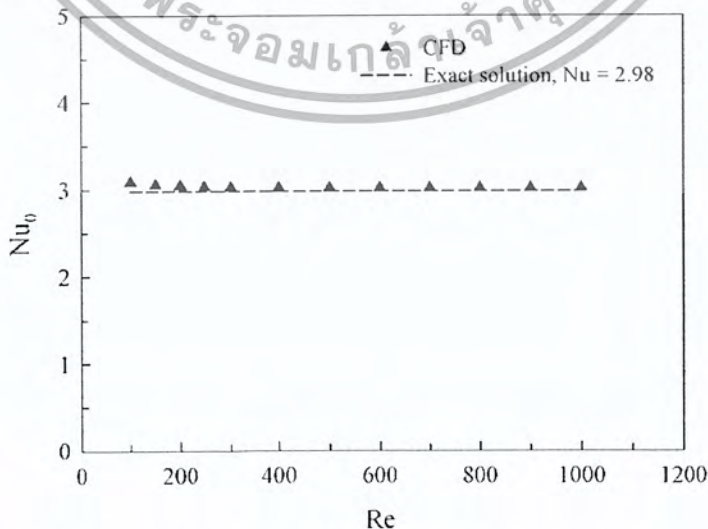
ผลเฉลยแม่นยำตรงค่าเลขนัยเซกซ์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว กรณีอุณหภูมิมันคงที่ที่จะได้

$$Nu = 2.98 \quad (4.4)$$

เช่นกันจะได้ค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

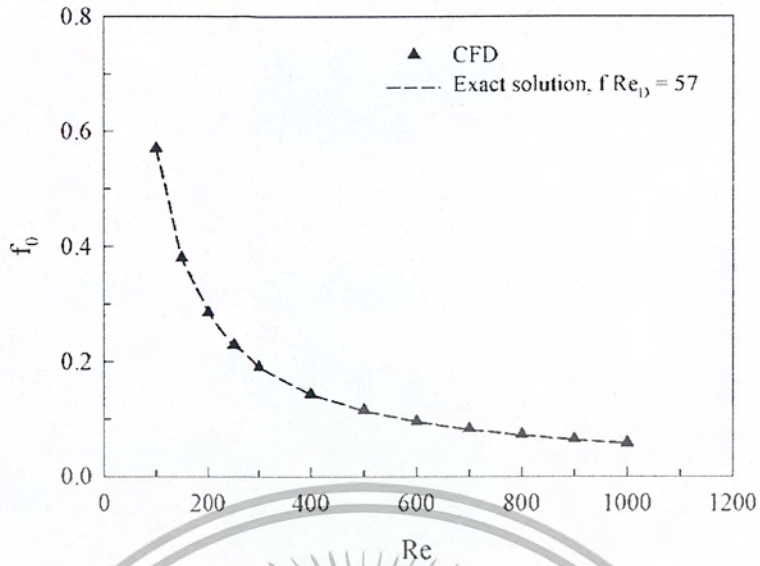
$$f = \frac{57}{Re} \quad (4.5)$$

เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมจะมีความแตกต่างเฉลี่ย 1.5% ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ผลที่ได้จากทั้งโปรแกรมและจากผลเฉลยแม่นยำตรงให้ผลที่สอดคล้องกัน ทำให้ยืนยันได้ว่าแบบจำลองการไหล 3 มิติ รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้พื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม สามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลในการถ่ายเทความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ได้



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าเลขนัยเซกซ์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับผลที่ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบระหว่างผลเฉลย
แม่นยำกับค่าที่ได้จากการจำลอง



บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย

5.1 บทนำ

โดยทั่วไปสมรรถนะเชิงความร้อนจะสัมพันธ์กับการสูญเสียความดันเนื่องจากความเสียดทาน การเพิ่มสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนมักจะได้มาพร้อมกับการสูญเสียความดันที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับของไหลที่มีความหนาแน่นต่ำ(ก๊าซ) การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมักจะนำไปสู่ความสิ้นเปลืองกำลังทางกลในรูปของพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์หรือพัดลม เพราะฉะนั้นการออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงจะต้องมีการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนในอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังทางกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนของไหล

ในบทนี้จะศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสจากการจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งการถ่ายเทความร้อนได้แสดงในเทอมของเลขนัสเซิลท์ และผลของการสูญเสียความดันจะแสดงในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน จากพารามิเตอร์ทั้งสองนำมาสู่การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีอุณหภูมิผิวคงที่ (Constant Surface Temperature) โดยการศึกษาจะพิจารณาถึงอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส์และแผ่นออริฟิสในรูปแบบต่างๆซึ่งได้ทำการศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ และอิทธิพลของความสูงของแผ่นออริฟิสซึ่งจะอธิบายในรูปของอัตราส่วนการบดบัง (Blockage ratio, BR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 ตามลำดับ หลังจากที่ได้มุมปะทะที่เหมาะสมแล้วก็นำมาสร้างแบบจำลองเพิ่มเติม โดยเปลี่ยนเป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดแผ่นครีปรูปตัวยูในรูปแบบต่างๆซึ่งได้ทำการศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ และอิทธิพลของความสูงของแผ่นครีปรูปตัวยูจะอธิบายในรูปของอัตราส่วนการบดบัง (Blockage ratio, BR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.10, 0.20, 0.30 และ 0.40 ตามลำดับ โดยทำการศึกษาการไหลแบบลามินาร์ในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ 100 ถึง 1200

5.2 แผ่นออริฟิส (Orifice)

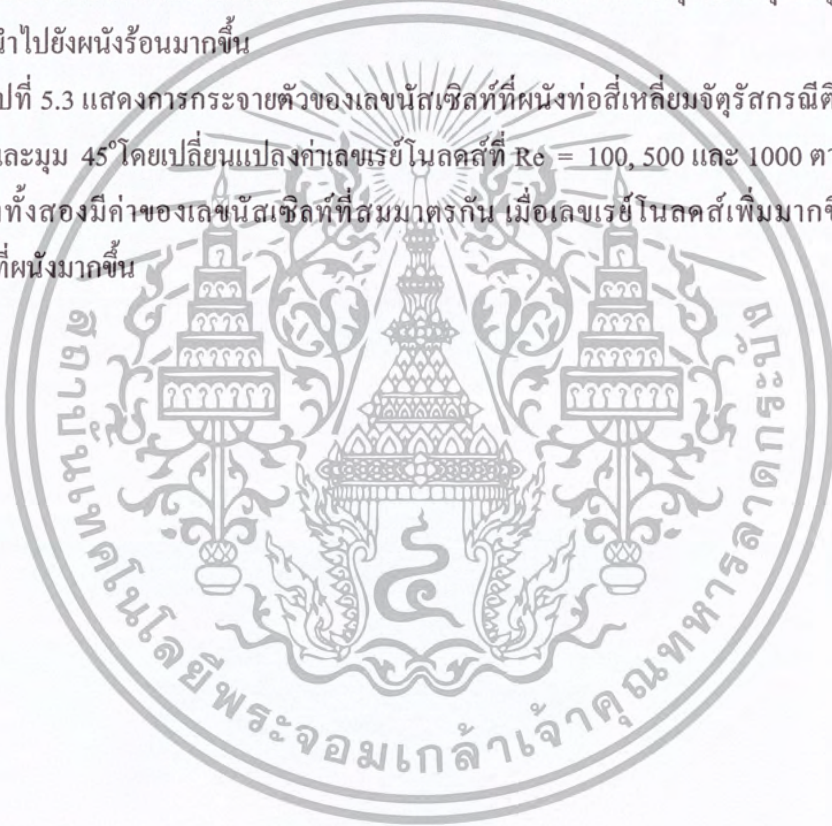
ในส่วนของหัวข้อนี้เราพิจารณาท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดแผ่นออริฟิส ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60°) ที่ติดอยู่ภายในท่อ ในการจำลองนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนความสูงของแผ่นออริฟิสที่ค่าอัตราส่วนการบดบัง BR = 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

5.2.1 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส์

พิจารณารูปที่ 5.1 แสดงเส้นกระแสการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีคิดแผ่นออริฟิส $BR = 0.25$ และมุม 45° โดยเปลี่ยนแปลงค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่ $Re = 100, 500$ และ 1000 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นเส้นกระแสจะมีการไหลหมุนวนตามแกน z ที่มีความปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้น และวงของกระแสหมุนวนมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้มีพื้นที่ในการกวาดไปตามพื้นผิวถ่ายเทความร้อนมากขึ้น

ในรูปที่ 5.2 แสดงค่าอุณหภูมิของไหลที่ไหลผ่านท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีคิดแผ่นออริฟิส $BR = 0.25$ และมุม 45° โดยเปลี่ยนแปลงค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่ $Re = 100, 500$ และ 1000 ตามลำดับพบว่าถ้าค่า Re มากขึ้นส่งผลให้ของไหลมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังมากขึ้น สังเกตได้จากอุณหภูมิของไหลเย็นมีการเหนี่ยวนำไปยังผนังร้อนมากขึ้น

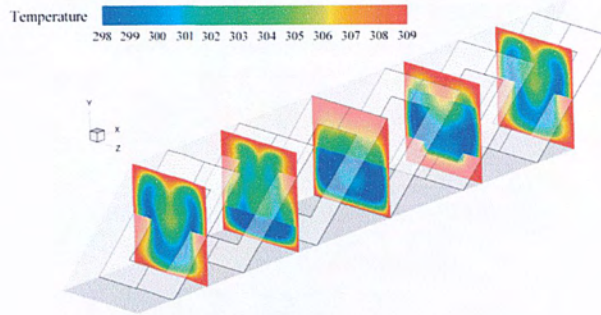
ในรูปที่ 5.3 แสดงการกระจายตัวของเลขนัสเซลที่ผนังท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีคิดแผ่นออริฟิส $BR = 0.25$ และมุม 45° โดยเปลี่ยนแปลงค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่ $Re = 100, 500$ และ 1000 ตามลำดับ พบว่าผนังด้านข้างทั้งสองมีค่าของเลขนัสเซลที่สมมาตรกัน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มมากขึ้นจะมีค่าของเลขนัสเซลที่ผนังมากขึ้น



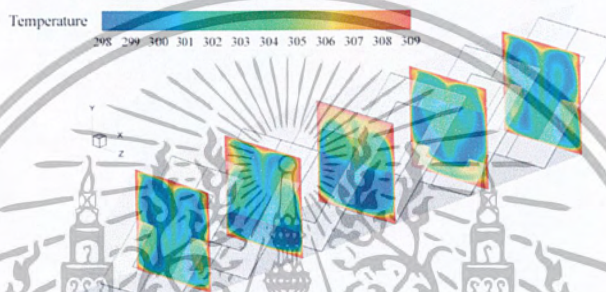


รูปที่ 5.1 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ $BR = 0.25$ และมุม 45°

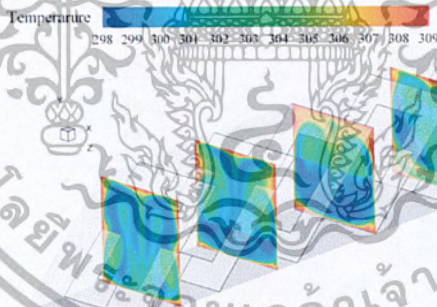
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Re=100



Re=500



Re=1000

รูปที่ 5.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในท่อกรณีติดแผ่นออร์ฟิสที่ค่า $BR = 0.25$ และมุม 45° ในระนาบขวางการไหล



รูปที่ 5.3 การกระจายตัวของเลขนัสเซลท์ที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ค่า $BR = 0.25$ และมุม 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 อิทธิพลของค่าอัตราส่วนการบดอัด

พิจารณารูปที่ 5.4 แสดงเส้นกระแสการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสที่เลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 1000 และมุม 45° โดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการบดอัดที่ $BR = 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับ พบว่าเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้นเส้นกระแสจะมีการไหลหมุนวนตามแกน x ที่มีความปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้น และวงของกระแสหมุนวนมีขนาดใหญ่มากขึ้นดังรูป ทำให้มีพื้นที่ในการกวาดไปตามพื้นผิวถ่ายเทความร้อนมากขึ้น

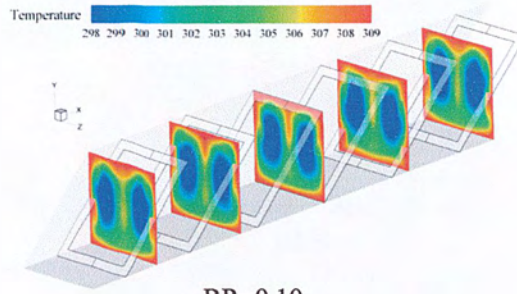
ในรูปที่ 5.5 แสดงค่าอุณหภูมิของไหลที่ไหลผ่านท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ $Re=1000$ และมุม 45° โดยเปลี่ยนแปลงค่าเลข $BR = 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับพบว่าถ้าค่า Re มากขึ้นส่งผลให้ของไหลมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังมากขึ้น ดังเหตุได้จากอุณหภูมิของไหลเย็นมีการเหนี่ยวนำไปยังผนังร้อนมากขึ้น

ในรูปที่ 5.6 แสดงการกระจายตัวของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสที่เลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 1000 และมุม 45° โดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการบดอัดที่ $BR = 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับพบว่าเมื่อค่า BR เพิ่มมากขึ้นจะมีค่าของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังมากขึ้น โดยที่ค่า $BR = 0.25$ จะมีค่าของเลขนัสเซิลท์สูงที่สุด ตามด้วยกรณี $BR = 0.20$ และ $BR = 0.15$ ตามลำดับ

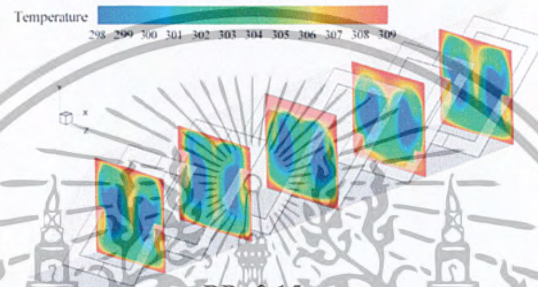


รูปที่ 5.4 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ $Re = 1000$ และมุม 45°

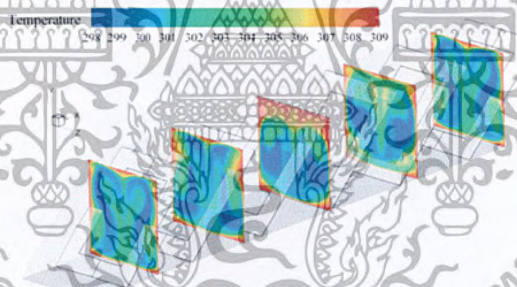
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



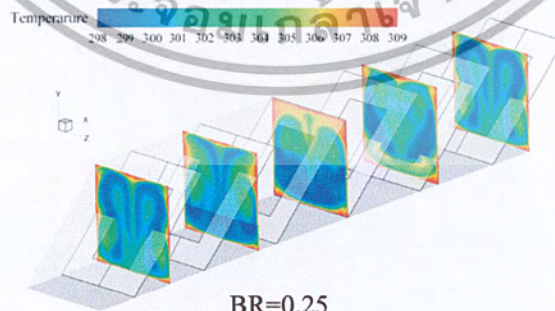
BR=0.10



BR=0.15



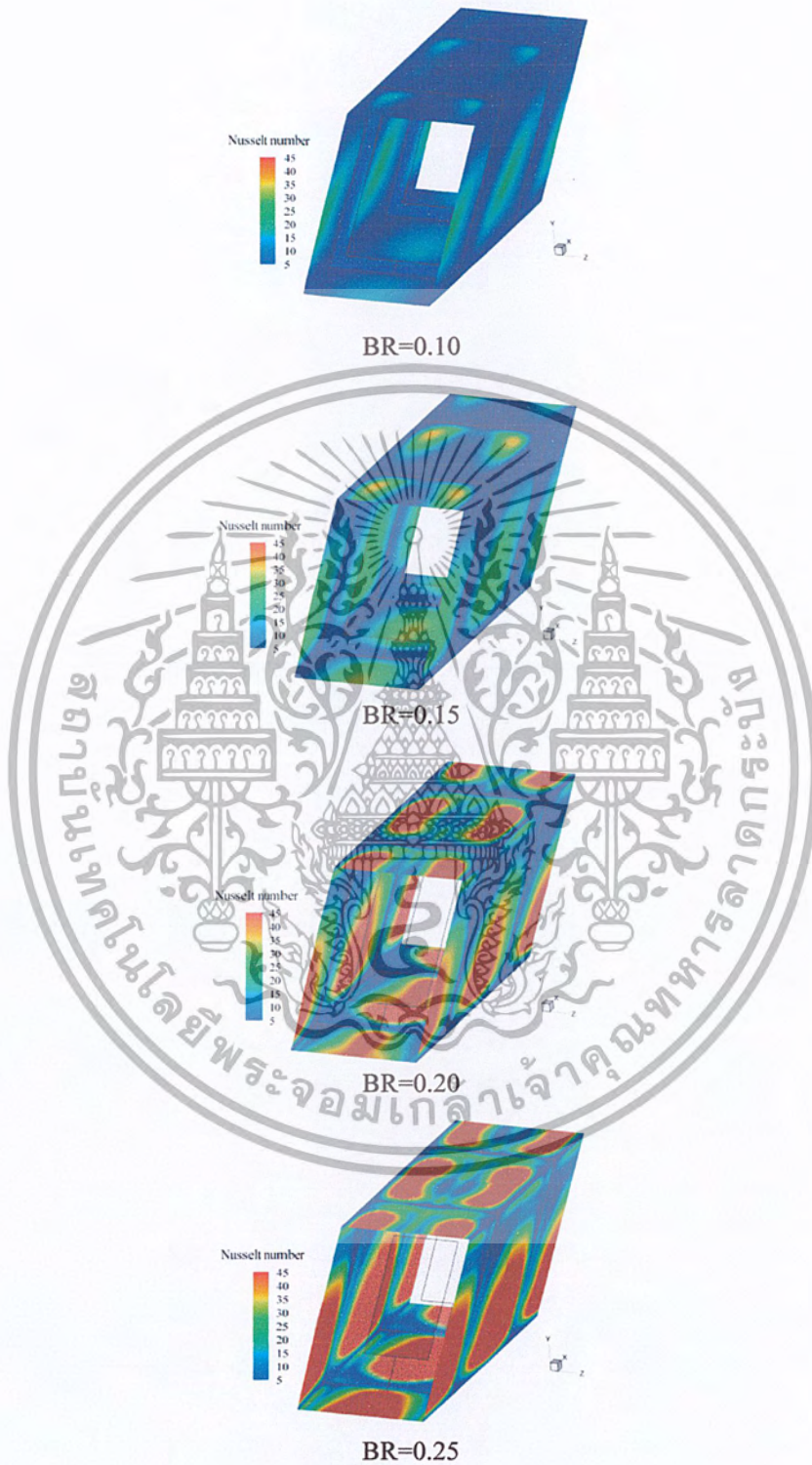
BR=0.20



BR=0.25

รูปที่ 5.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในท่อกรณีติดแผ่นอริฟิสที่ค่า $Re=1000$ และมุม 45° ในระนาบขวางการไหล

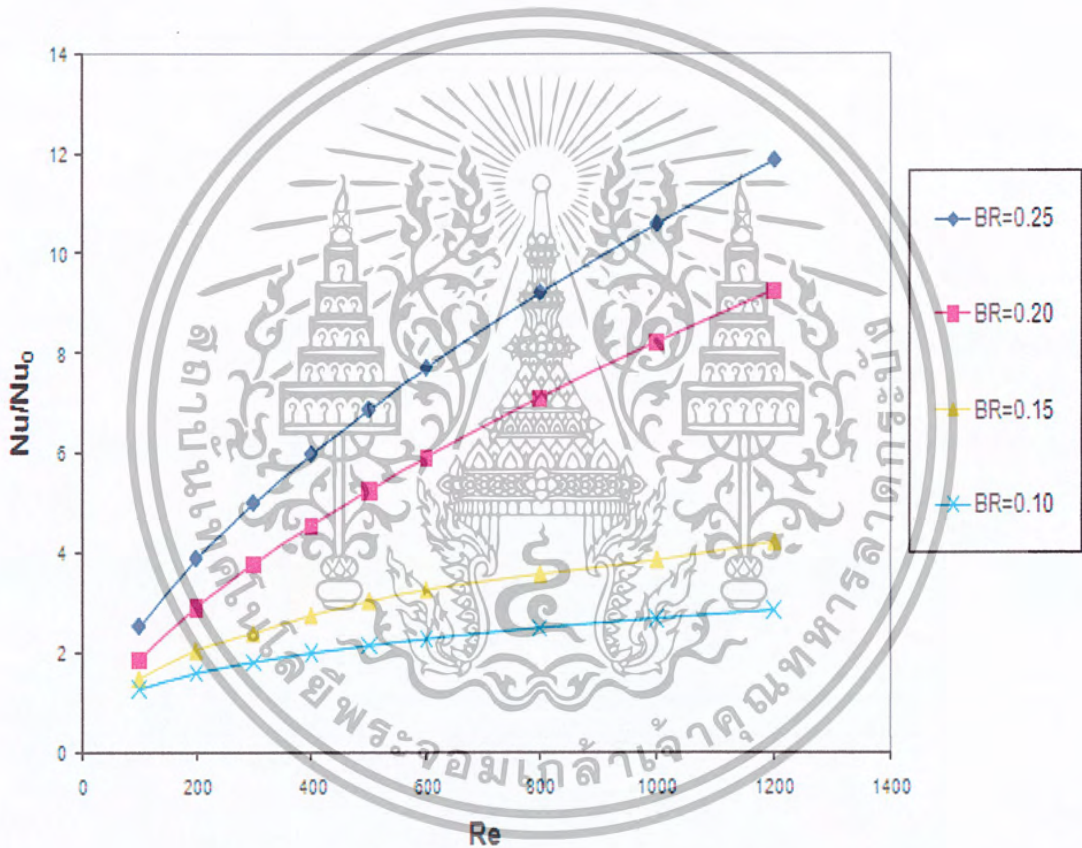
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 การกระจายตัวของเลขนัสเซลท์ที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ $Re = 1000$ และมุม 45°

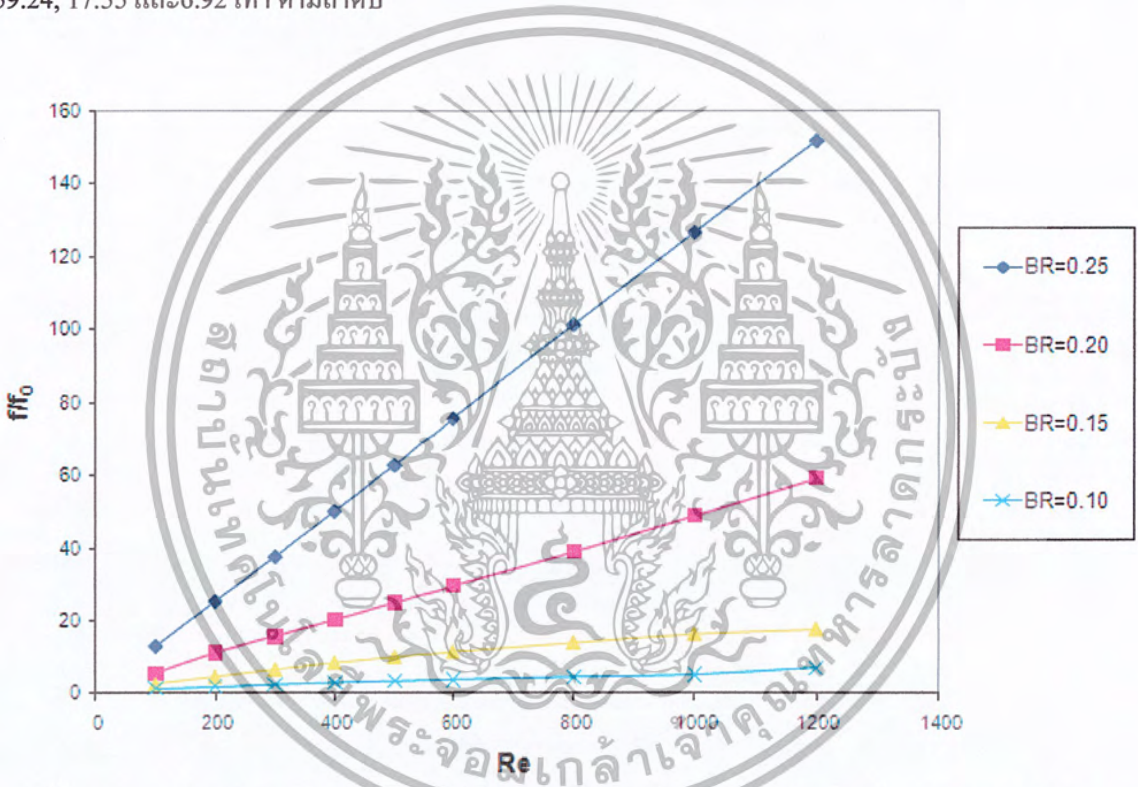
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ซึ่งพิจารณาเลขนัสเซลล์ท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีแผ่นออริฟิสต่อเลขนัสเซลล์ท์ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาที่ $BR = 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับ จากการจำลองพบว่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และยังพบว่าจากเลขเรย์โนลด์ส์ช่วง 100-1000 กรณีค่า $BR = 0.25$ ให้อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์สูงที่สุดซึ่งมีค่า 11.84 เท่าของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ ตามด้วยกรณี $BR = 0.20, 0.15$ และ $BR = 0.10$ ซึ่งให้ค่าเลขนัสเซลล์ท์ที่สูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 9.23, 4.21 และ 2.84 เท่าตามลำดับ



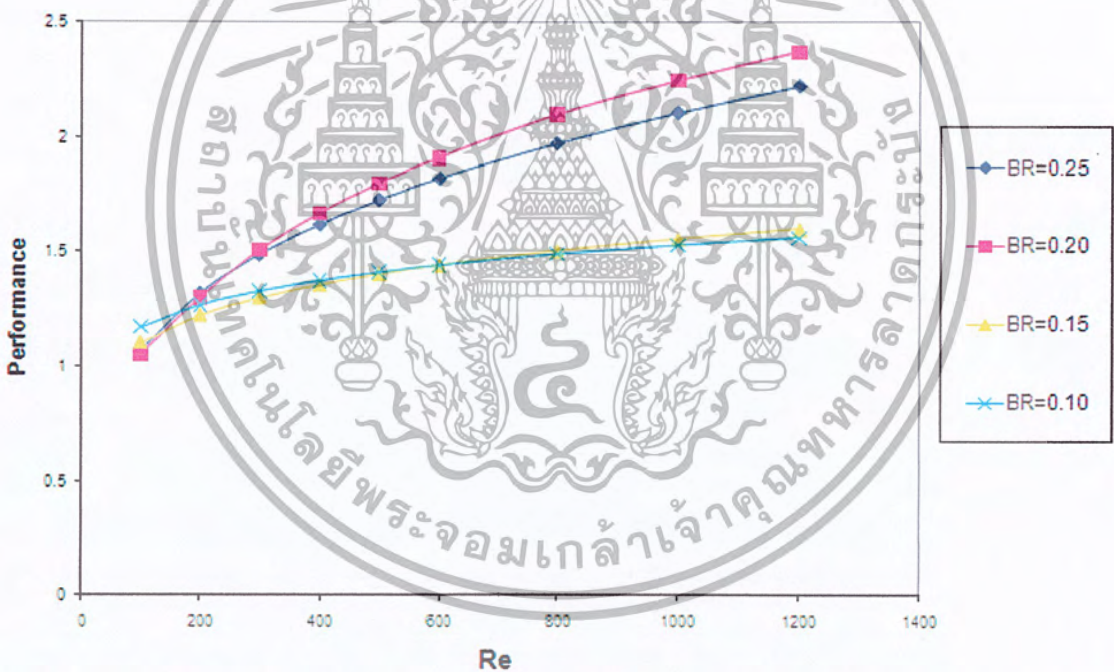
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อติดแผ่นออริฟิสที่ค่า BR ต่างๆ

ในรูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานซึ่งพิจารณาตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ จากการจำลองท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ $BR = 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น ทุกค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลอง กรณี $BR = 0.25$ จะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 151.88 เท่า ตามด้วยกรณี $BR = 0.20, 0.15$ และ $BR = 0.10$ ตามลำดับ โดยให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 59.24, 17.55 และ 6.92 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อติดแผ่นออริฟิสที่ค่า BR ต่างๆ

ในรูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน, η กับเลขเรย์โนลด์ส์ของการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ $BR = 0.10, 0.15, 0.20$ และ $BR = 0.25$ ตามลำดับ พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ค่า BR ต่างๆ เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มสูงมากขึ้นทำให้เกิดการไหลหมุนวนมากขึ้นจึงมีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นเป็นผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้น และพบว่าจากช่วงค่าเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ กรณี $BR = 0.10$ ถ้าแผ่นกั้นมีอัตราส่วนการบล็อคน้อยๆ เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มสูงขึ้นกระแสการไหลส่วนใหญ่จะข้ามแผ่นครีบไป ซึ่งเกิดการหมุนวนที่บริเวณด้านหลังแผ่นครีบน้อยทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้อยจึงส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนลดลง และยังพบว่าจากช่วงค่าเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ กรณี $BR = 0.20$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.32 ตามด้วยกรณี $BR = 0.25, 0.15$ และ 0.10 ตามลำดับ โดยมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 2.23, 1.62 และ 1.42 ตามลำดับ



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อติดแผ่นออริฟิสที่ค่า BR ต่างๆ

5.2.3 อธิทฤษฎีของมุมปะทะ

พิจารณารูปที่ 5.10 แสดงเส้นกระแสการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ $\alpha = 30^\circ$, 45° และ 60° ตามลำดับ ที่ค่า $BR = 0.25$ และ $Re = 500$ ซึ่งเส้นกระแสไหลเข้าในทิศทางแกน $+x$ พบว่ากรณี $\alpha = 30^\circ$, 45° และ 60° จะเกิดกระแสการไหลที่หมุนควง กระแสสวนทั้งสองจะเสริมกันแล้วตกกระทบบนผนังด้านซ้ายแล้วจึงแยกจากกันมาตกกระทบบนผนังด้านบนหรือด้านล่างที่ลูกกระแสการหมุนนั้นติด จากช่วงมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ$ ถึง 45° เมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้นจะเกิดการไหลหมุนควงที่มีความปั่นป่วนมากขึ้นแล้วไปตกกระทบบนผนังด้านซ้ายมีความรุนแรงมากขึ้น และระยะทางที่ไปตกกระทบบจะสั้นลง สามารถสังเกตได้ว่าที่ $\alpha = 45^\circ$ จะมีกระแสการหมุนควงที่ปั่นป่วนมากกว่าและใช้ระยะทางในการไปตกกระทบบน้อยกว่าที่ $\alpha = 30^\circ$ และ 60°

ในรูปที่ 5.11 แสดงค่าอุณหภูมิของไหลที่ไหลผ่านท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ $BR=0.25$ และ $Re=500$ โดยเปลี่ยนแปลงค่ามุมปะทะ $\alpha = 30^\circ$, 45° และ 60° ตามลำดับ พบว่าอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะส่งผลให้ของไหลมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณผนังมากขึ้น สังเกตได้จากอุณหภูมิของไหลเย็นมีการเหนี่ยวนำไปยังผนังร้อนมากขึ้น จากการจำลองจะพบว่าที่ $\alpha = 45^\circ$ ของไหลเย็นจะเหนี่ยวนำลงไปกระทบบบริเวณผนังที่มากที่สุด

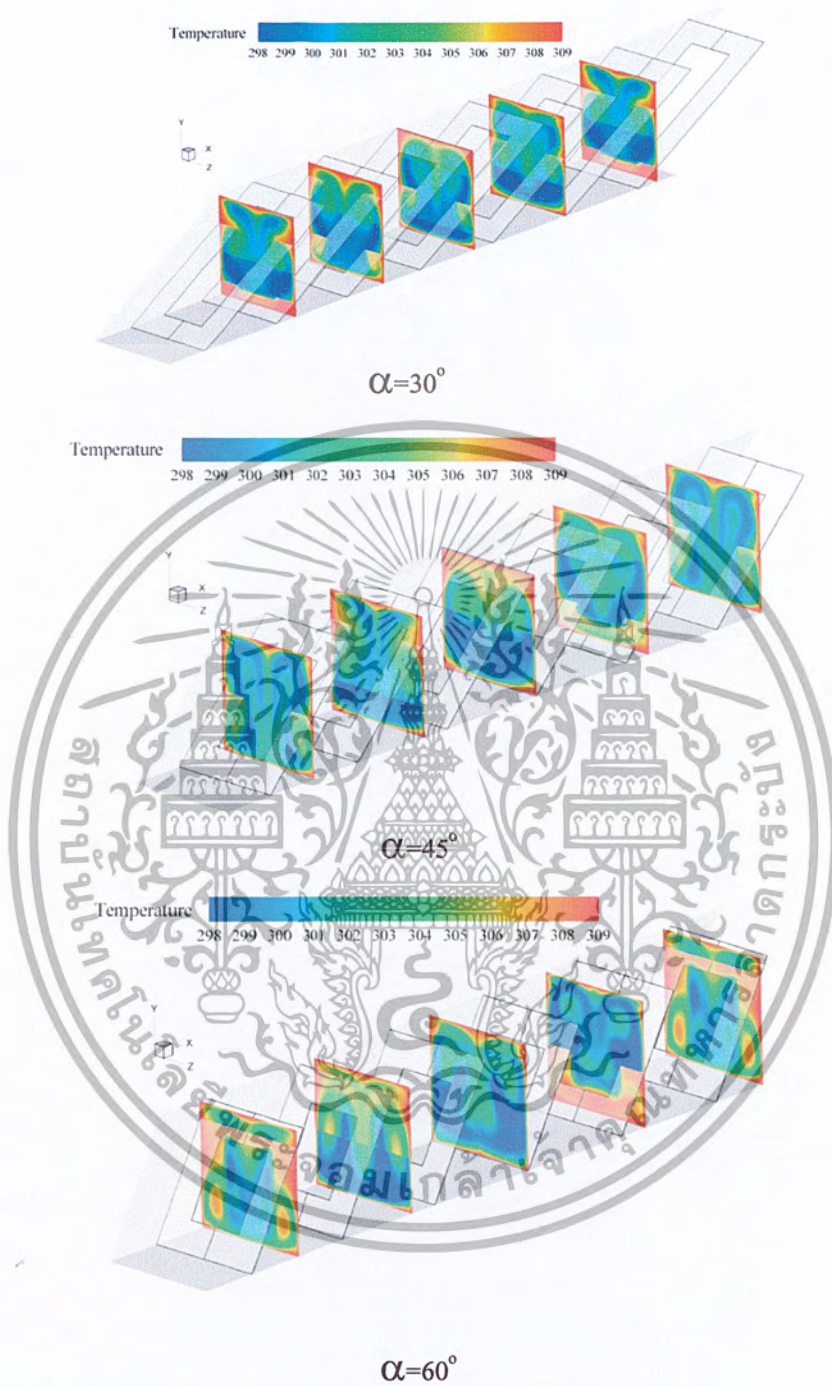
ในรูปที่ 5.12 แสดงการกระจายของค่าของเลขนัสเซลล์ที่ผนังท่อที่ผนังท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ $\alpha = 30^\circ$, 45° และ 60° ตามลำดับ ที่ค่า $BR = 0.25$ และ $Re = 500$ พบว่าช่วง $\alpha = 30^\circ$ ถึง 45° จะมีค่าของเลขนัสเซลล์ที่บริเวณผนังด้านข้างสูงมากกว่าที่ผนังด้านอื่นๆ เมื่อค่ามุมปะทะเพิ่มขึ้นจะมีค่าของเลขนัสเซลล์ที่ผนังมากขึ้น ส่วนกรณี $\alpha = 60^\circ$ จะมีค่าของเลขนัสเซลล์ที่บริเวณผนังน้อยลงเนื่องจากของไหลไหลผ่านท่อได้ยากเกินไป และยังพบว่ากรณี $\alpha = 45^\circ$ จะให้ค่าของเลขนัสเซลล์ที่ผนังมากที่สุดตามด้วยกรณี $\alpha = 60^\circ$ และ 30° ตามลำดับ



รูปที่ 5.10 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่มุมปะทะต่างๆที่ค่า $BR = 0.25$

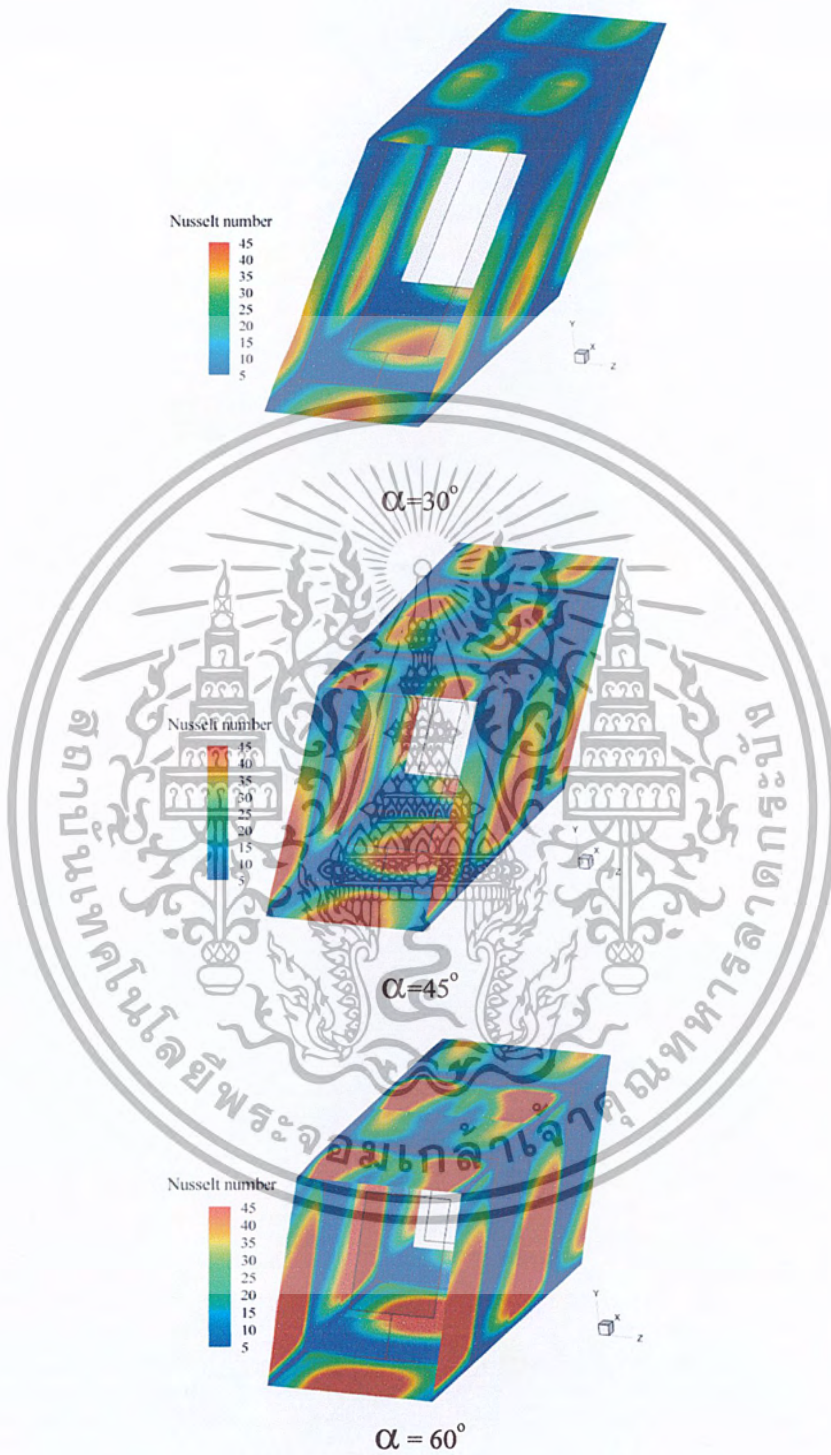
และ $Re = 500$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ค่าที่ค่า $BR = 0.25$ และ $Re = 500$ ในระนาบขวางการไหล

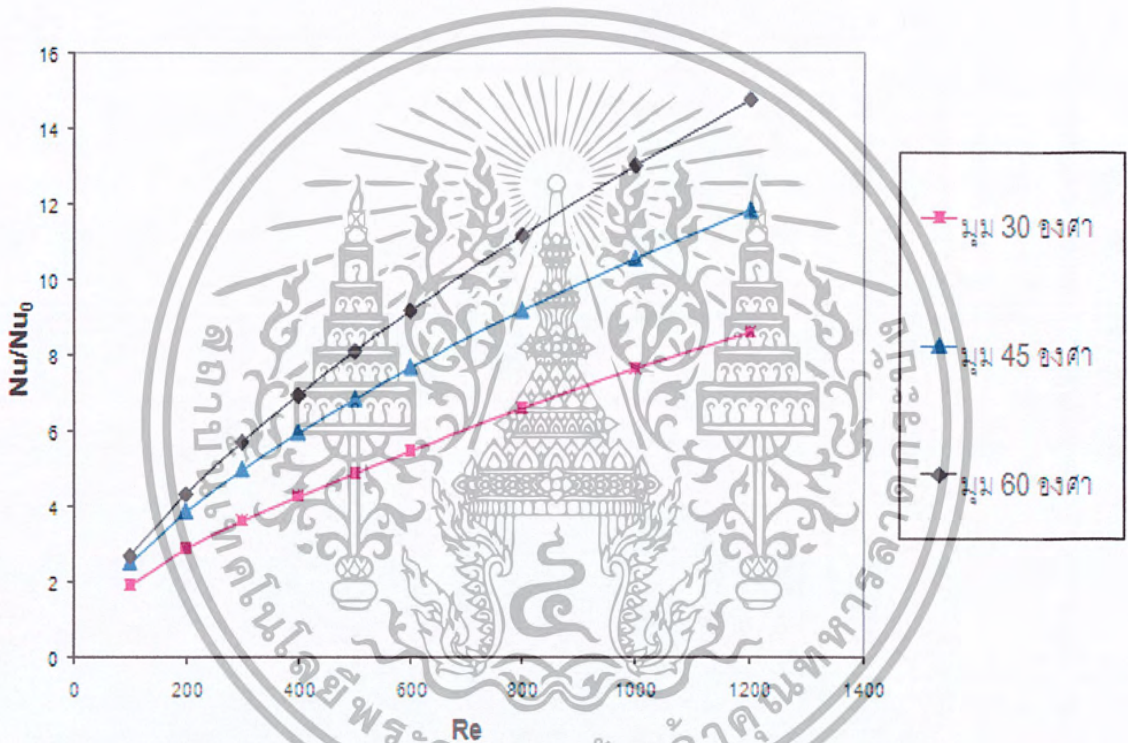
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 การกระจายตัวของเลขนัสเซลท์ที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นอริฟิสที่มีมุมปะทะต่างๆที่ค่า $BR = 0.20$
และ $Re = 500$

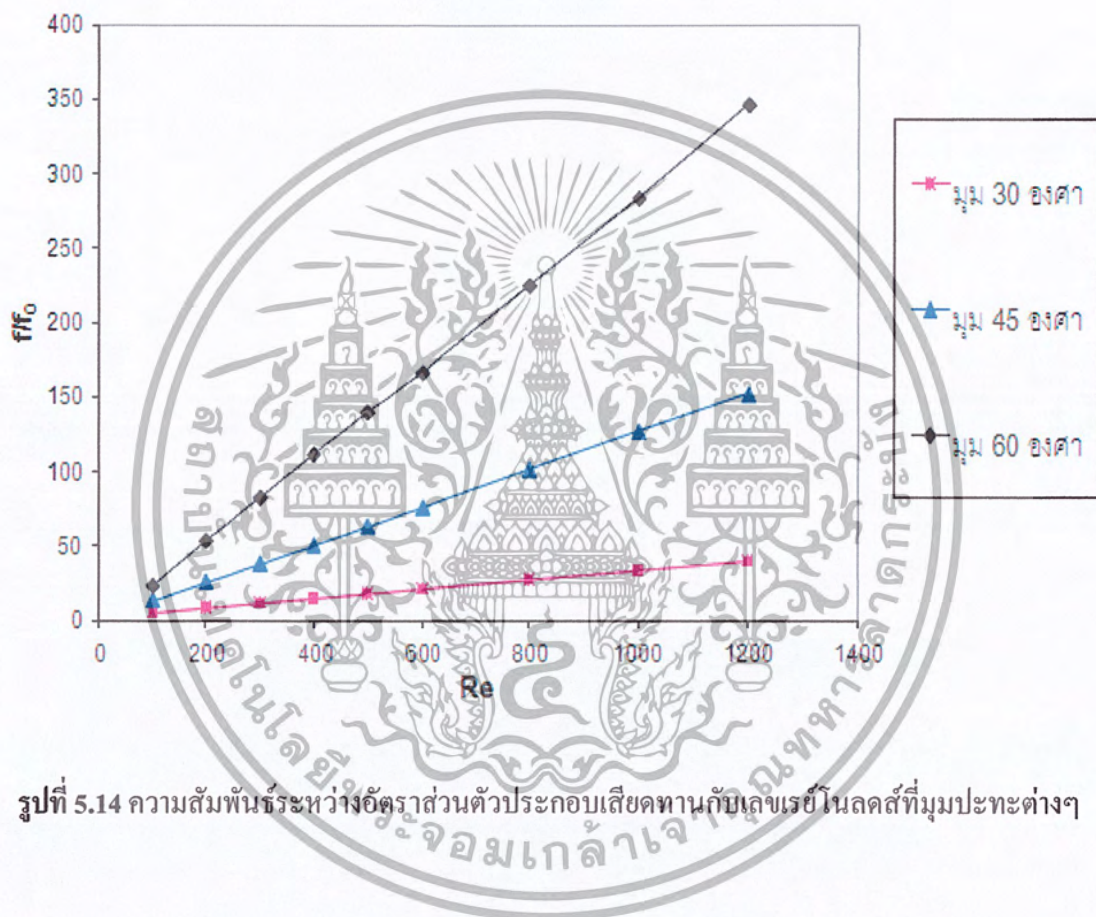
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสทำมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการบล็อก $BR = 0.25$ และ $PR = 1$ พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสทุกกรณีจะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์และยังพบว่ากรณี $\alpha = 60^\circ$ จะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์สูงสุดทุกค่าอัตราส่วนการบล็อกที่พิจารณา ตามด้วยกรณี $\alpha = 45^\circ$ และ 30° ตามลำดับ



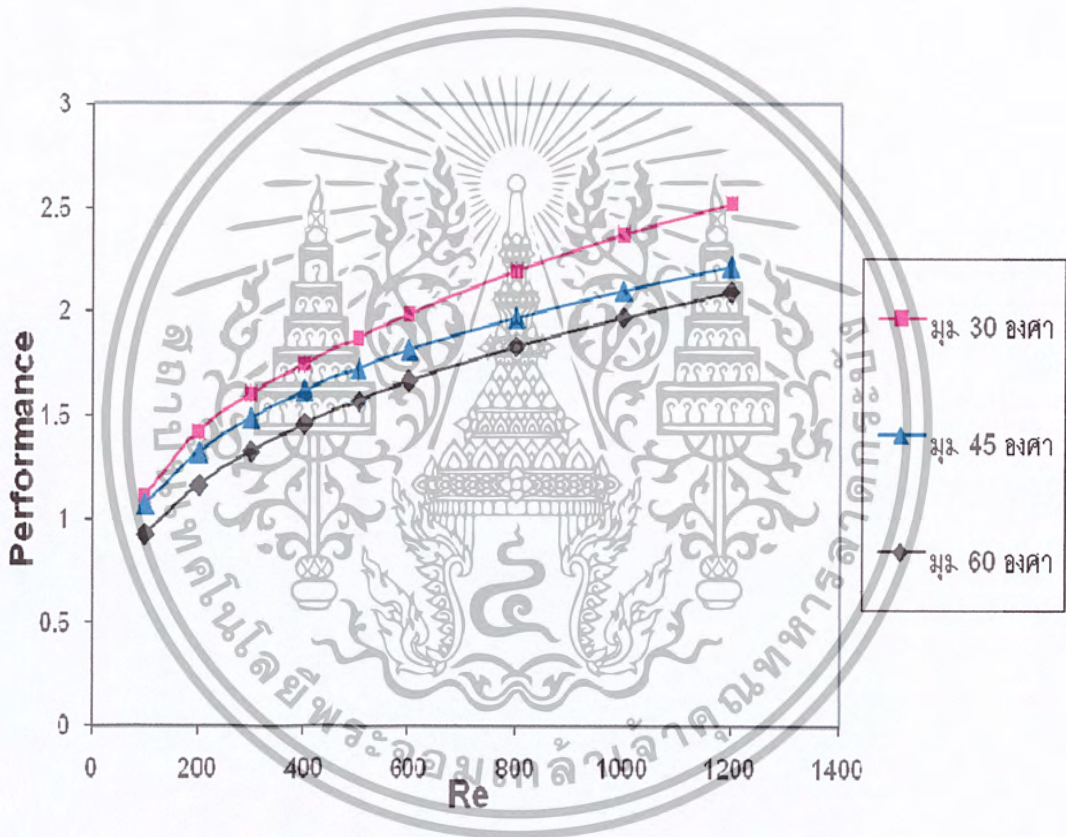
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ

ในรูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสทำมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการบล็อก $BR = 0.25$ และ $PR = 1$ พบว่าในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลองทุกกรณีมุมปะทะจะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ ซึ่งในกรณี $\alpha = 60^\circ$ ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงสุดในทุกอัตราส่วนการบล็อกที่พิจารณา ตามด้วยกรณี $\alpha = 45^\circ$ และ 30° ตามลำดับ



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ

ในรูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (η) กับเลขเรย์โนลด์ส์ของการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีคิดแผ่นออริฟิซทำมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการบล็อก, $BR = 0.25$ และ $PR = 1$ พบว่าในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลองทุกกรณี มุมปะทะจะให้ค่า η เพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นและมีค่า η มากกว่าหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่มุมปะทะทั้งสามนี้ให้การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ และจะพบว่ากรณีมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ$ จะให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบถึง 2.52 เท่า



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ ที่ $BR = 0.2$

5.2.4 อธิพลของค่าระยะห่างระหว่างแผ่นครีป

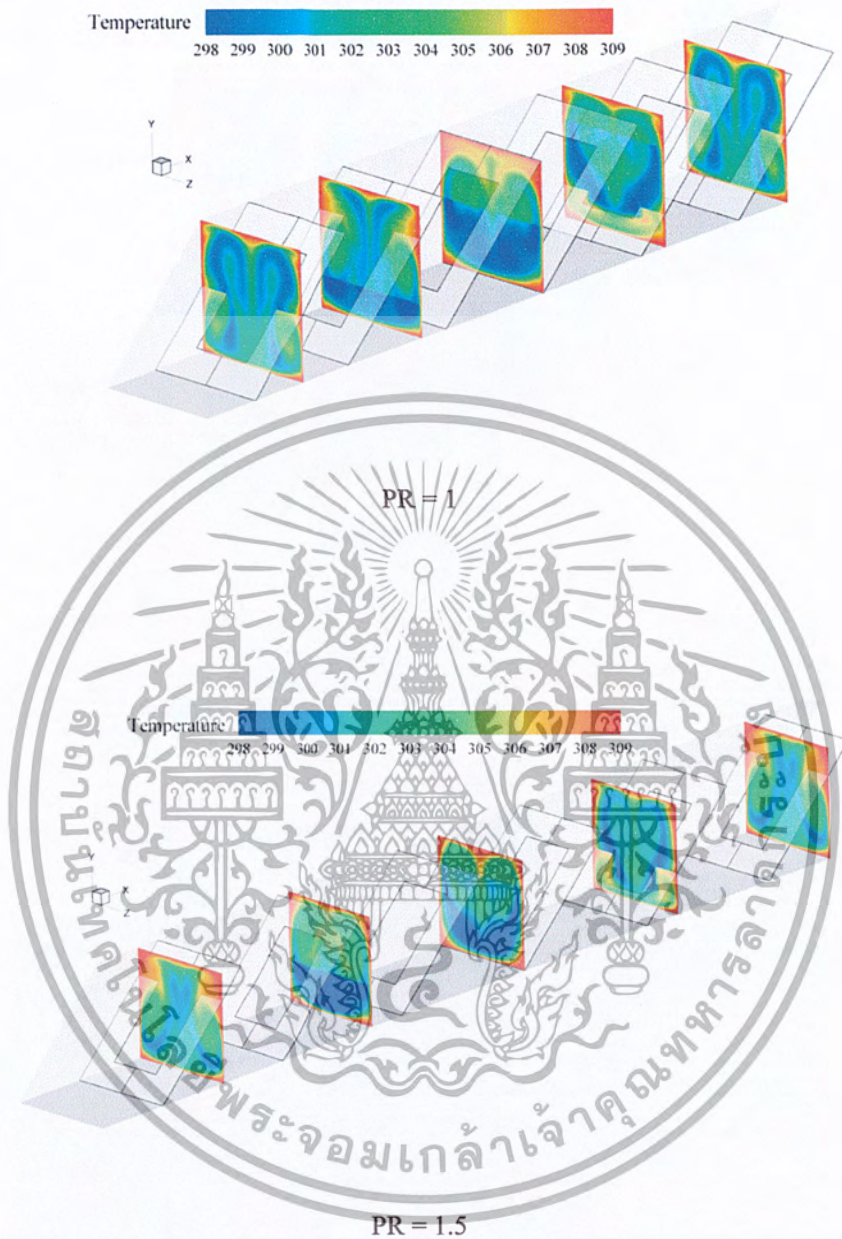
พิจารณารูปที่ 5.16 แสดงเส้นกระแสการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิส $BR = 0.25$ มุม 45° และ $Re = 500$ โดยเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างแผ่นครีปที่ $PR = 1$ และ 1.5 พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นครีปเพิ่มขึ้นเส้นกระแสจะมีการไหลหมุนวนตามแกน z ที่มีความปั่นป่วนลดน้อยลงเพียงเล็กน้อย และวงของกระแสหมุนวนมีขนาดเล็กลงทำให้มีพื้นที่ในการกวาดไปตามพื้นผิวถ่ายเทความร้อนน้อยลง

ในรูปที่ 5.17 แสดงค่าอุณหภูมิของไหลที่ไหลผ่านท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิส $BR = 0.25$ มุม 45° และ $Re = 500$ โดยเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างแผ่นครีปที่ $PR = 1$ และ 1.5 พบว่าเมื่อค่า PR มากขึ้นจะไม่ส่งผลให้ของไหลมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังมากขึ้น สังเกตได้จากอุณหภูมิของไหลเช่นมีการเหนี่ยวนำไปยังผนังร้อนน้อยลง

ในรูปที่ 5.18 แสดงค่าของเลขนัสเซิลที่ผนังท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิส $BR = 0.25$ มุม 45° และ $Re = 500$ โดยเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างแผ่นออริฟิสที่ $PR = 1$ และ 1.5 พบว่าผนังด้านข้างทั้งสองมีค่าของเลขนัสเซิลที่สมมาตรกัน เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นออริฟิสเพิ่มมากขึ้นจะมีค่าของเลขนัสเซิลที่ผนังลดลง

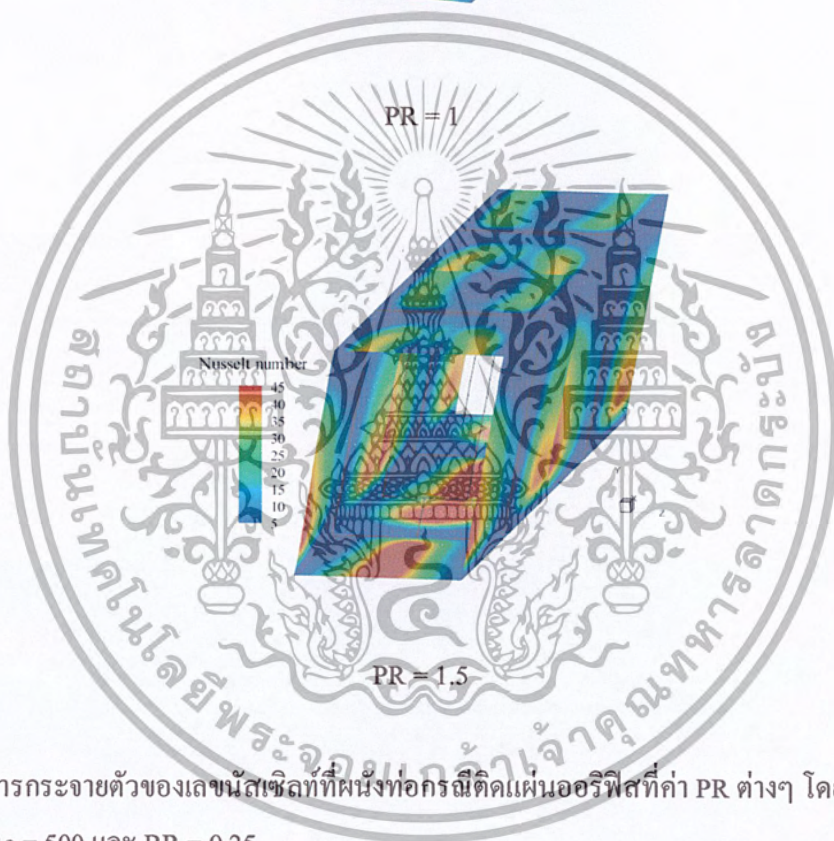
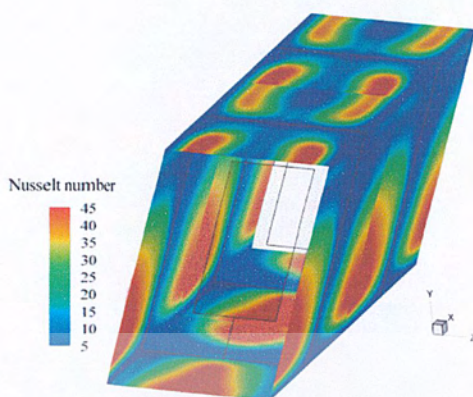


รูปที่ 5.16 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในทอกรณิตัดแผ่นอริฟิสที่ PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$,
 $Re = 500$ และ $BR = 0.25$



รูปที่ 5.17 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในท่อกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ค่า PR ต่างๆที่ $\alpha = 45^\circ$, $Re = 500$ และ $BR = 0.25$ ในระนาบขวางการไหล

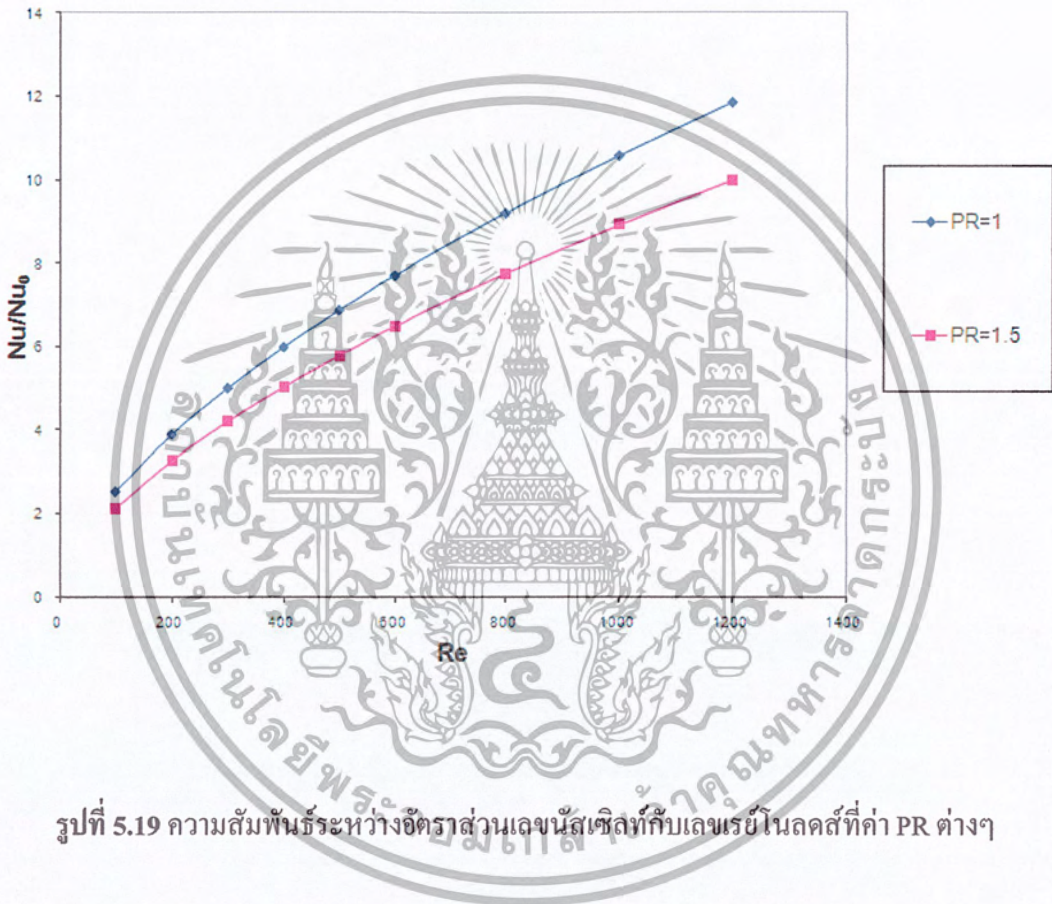
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 การกระจายตัวของเลขนัสเซลที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นอริฟิสที่ค่า PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$, $Re = 500$ และ $BR = 0.25$

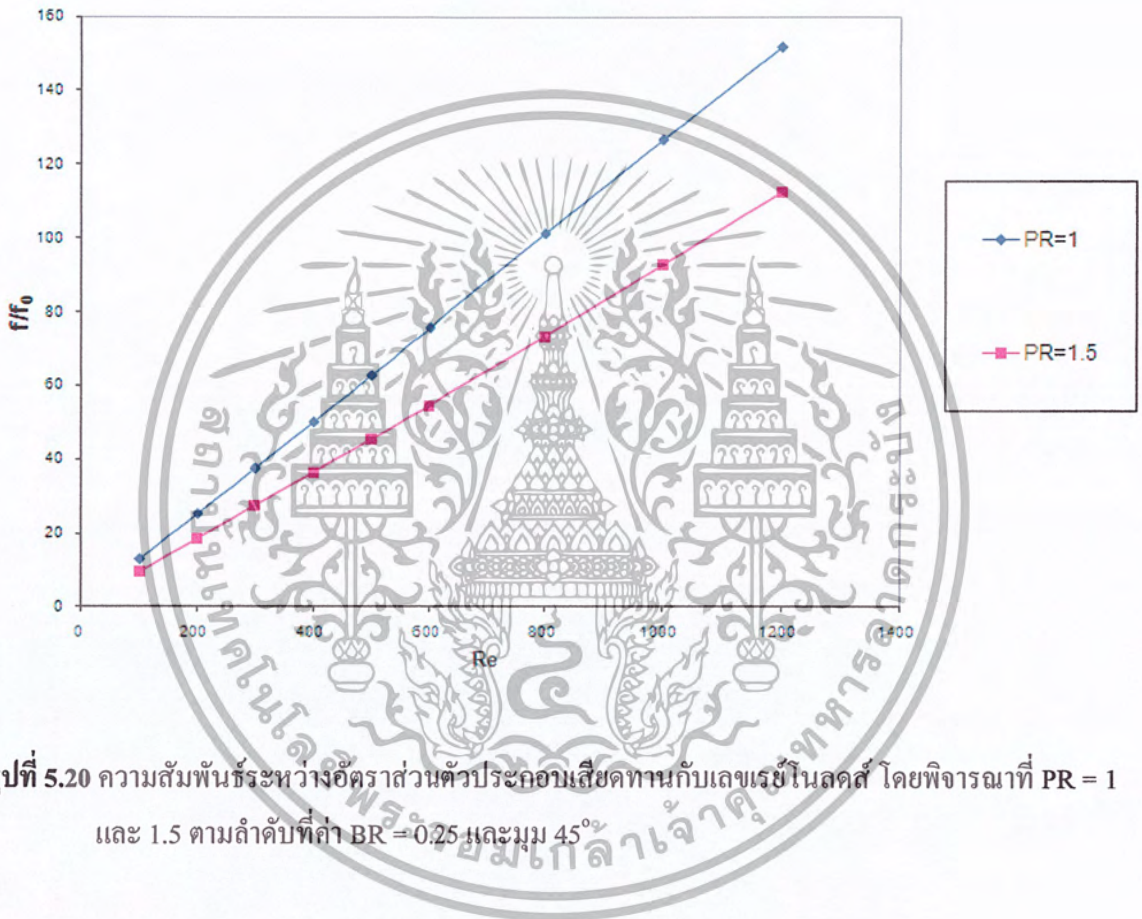
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองพบว่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และยังพบว่าจากเลขเรย์โนลด์ส์ช่วง 100-1200 กรณีค่า PR=1 ให้อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่สูงที่สุดซึ่งมีค่า 11.84 เท่าของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ ตามด้วยกรณี PR = 1.5 ซึ่งให้ค่าเลขนัสเซลล์ที่สูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 10.00



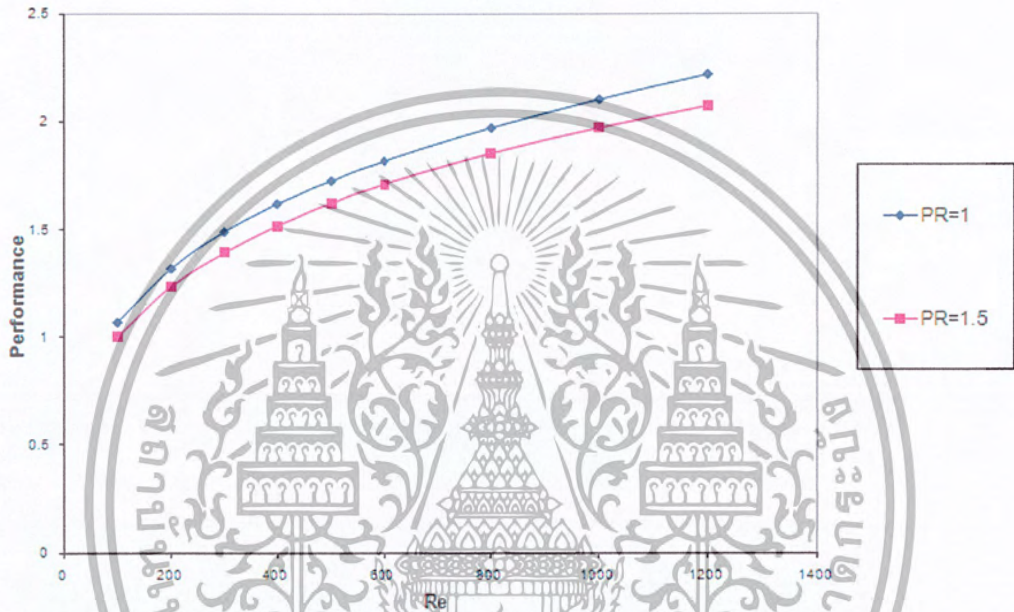
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ค่า PR ต่างๆ

จากการจำลองทอสีเหลี่ยมจัตุรัสกรณีคิดแผ่นออริฟิสที่มีระยะห่างระหว่างแผ่น $PR = 1$ และ 1.5 ตามลำดับ ที่ค่า $BR=0.25$ และมุม 45° พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นทุกค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลอง กรณี $PR = 1$ จะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าทอสีเหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 151.88 เท่า ตามด้วยกรณี $PR = 1.5$ โดยให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าทอสีเหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 112.36



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาที่ $PR = 1$ และ 1.5 ตามลำดับที่ค่า $BR = 0.25$ และมุม 45°

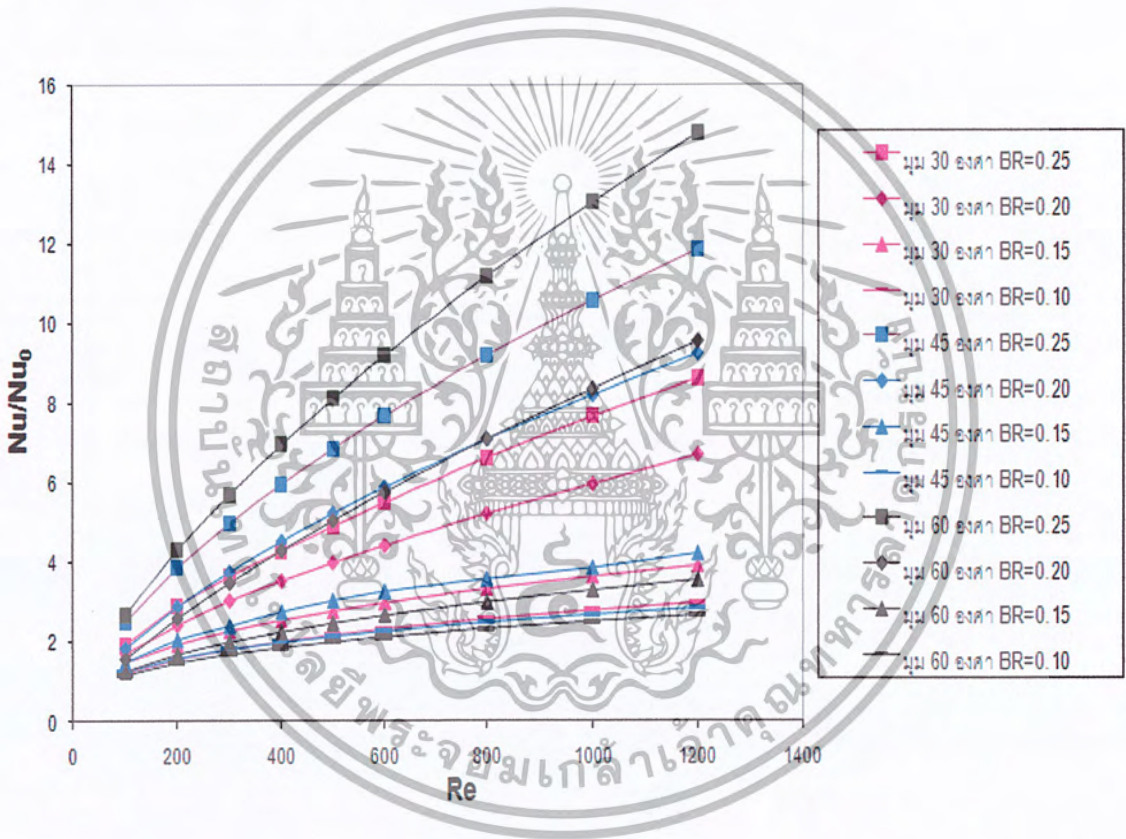
พบว่าในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลองทุกกรณีมุมปะทะจะให้ค่า η เพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นและมีค่า η มากกว่าหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่มุมปะทะทั้งสามนี้ให้การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ และจะพบว่ากรณี PR=1 จะให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบถึง 2.23 เท่า ตามด้วยกรณี PR=1.5 โดยให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 2.12



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (η) กับเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาที่ PR = 1 และ 1.5 ตามลำดับที่ค่า BR = 0.25 และมุม 45°

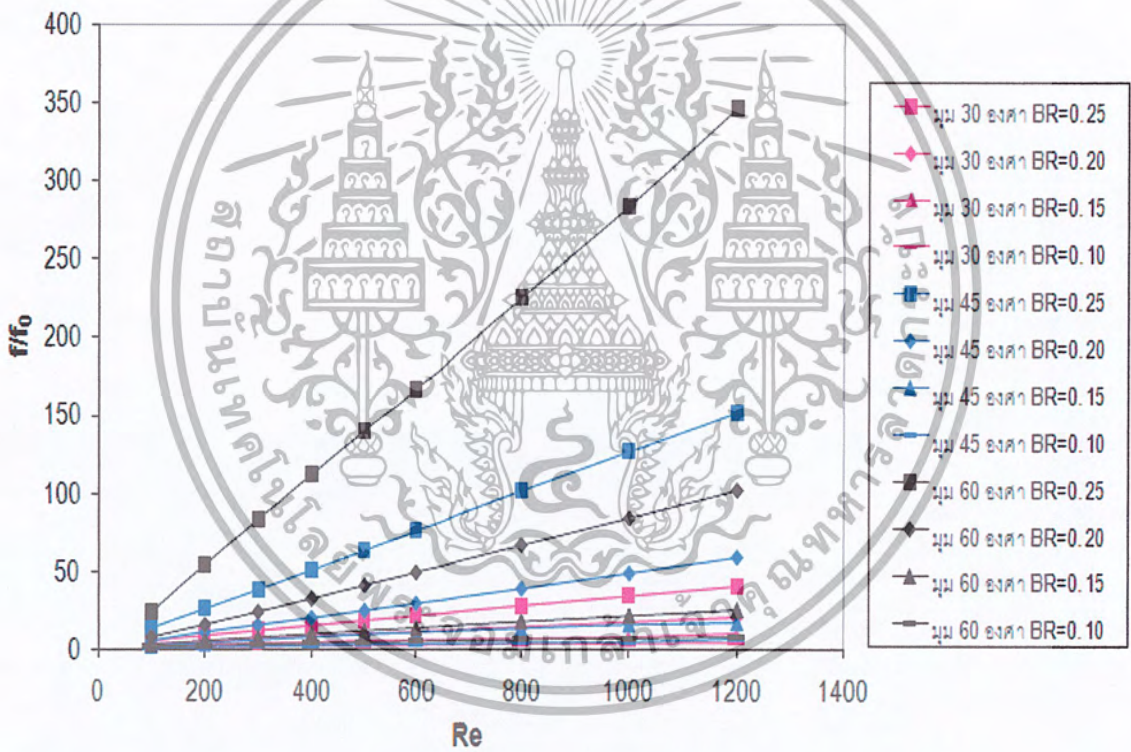
5.2.5 วิเคราะห์ผลข้อมูลทั้งหมดของแผ่นออริฟิส

จากรูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสทำมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการบล็อก $BR = 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับ โดยที่ค่า $PR = 1$ พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสทุกกรณีจะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และยิ่งพบว่ากรณี $\alpha = 60^\circ$ และ $BR = 0.25$ จะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ที่สูงที่สุดทุกค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่พิจารณา ให้ซึ่งมีค่า 14.77 เท่าของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ



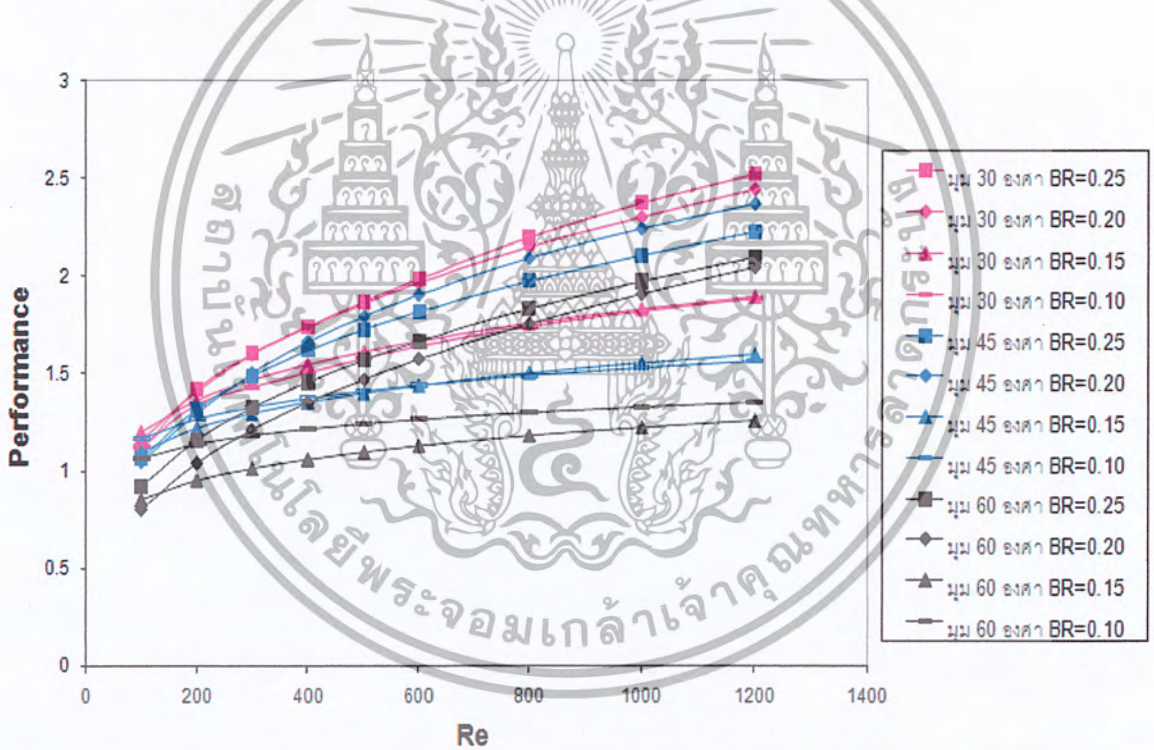
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มีมุมปะทะและค่า BR ต่างๆ โดยที่ $PR = 1$

ในรูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานซึ่งพิจารณาตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบกับเลขเรย์โนลด์ส จากการจำลองท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ $BR = 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับ และที่มุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น ทุกค่าเลขเรย์โนลด์สที่ใช้ในการจำลอง กรณีที่ $\alpha = 60^\circ$ และ $BR = 0.25$ จะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 346.82 เท่า ตามด้วยกรณีและ $\alpha = 45^\circ$ และ $BR = 0.25$ โดยให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 151.88 เท่า



รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สที่มุมปะทะและค่า BR ต่างๆ โดยที่ $PR = 1$

ในรูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน, η กับเลขเรย์โนลด์ส์ของการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ $BR = 0.10, 0.15, 0.20$ และ 0.25 ตามลำดับ และมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นออริฟิสที่ค่า BR และค่า α ต่างๆ เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มสูงมากขึ้นทำให้เกิดการไหลหมุนวนมากขึ้นจึงมีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นเป็นผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้น และพบว่าจากช่วงค่าเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ กรณี $BR = 0.10$ ถ้าแผ่นกั้นมีอัตราส่วนการบดเล็กน้อย เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มสูงขึ้นกระแสน้ำไหลส่วนใหญ่จะข้ามแผ่นออริฟิสไป ซึ่งเกิดการหมุนวนที่บริเวณด้านหลังแผ่นครีบน้อยทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้อยจึงส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนลดลง และยังพบว่าจากช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ กรณี $\alpha = 30^\circ$ และ $BR = 0.25$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.52 ตามด้วยกรณีกรณี $\alpha = 30^\circ$ และ $BR = 0.2$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าเท่ากับ 2.44



รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะและค่า BR ต่างๆ โดยที่ $PR = 1$

5.3 แผ่นครีบริบรูปตัวยู (U-shape)

ในส่วนของหัวข้อนี้เราพิจารณาท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่มุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ที่ติดอยู่ภายในท่อ ในการจำลองนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนความสูงของแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ค่าอัตราส่วนการบล็อก $BR = 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4 ตามลำดับ และมีค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นครีบริบ $PR = 1$ และ 1.5 ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความเสียหายจากการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

5.3.1 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส

พิจารณารูปที่ 5.25 แสดงเส้นกระแสการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ $BR = 0.20$ และมุม 45° โดยเปลี่ยนแปลงค่าเลขเรย์โนลด์สที่ $Re = 100, 500$ และ 1000 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นเส้นกระแสจะมีการไหลหมุนวนตามแกน x ที่มีความปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้น และวงของกระแสหมุนวนมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้มีพื้นที่ในการกวาดไปตามพื้นผิวถ่ายเทความร้อนมากขึ้น

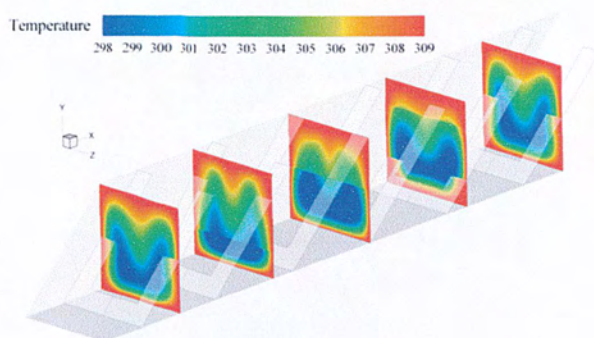
พิจารณารูปที่ 5.26 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลที่ไหลผ่านท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ $BR = 0.20$ และมุม 45° โดยเปลี่ยนแปลงค่าเลขเรย์โนลด์สที่ $Re = 100, 500$ และ 1000 ตามลำดับ พบว่าถ้าค่า Re มากขึ้นส่งผลให้ของไหลมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังมากขึ้น สังเกตได้จากอุณหภูมิของไหลเย็นมีการหนีขวน่าไปยังผนังร้อนมากขึ้น

พิจารณารูปที่ 5.27 แสดงกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ $BR = 0.20$ และมุม 45° โดยเปลี่ยนแปลงค่าเลขเรย์โนลด์สที่ $Re = 100, 500$ และ 1000 ตามลำดับ พบว่าผนังด้านข้างทั้งสองมีการกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่สมมาตรกัน เมื่อเลขเรย์โนลด์สเพิ่มมากขึ้นจะมีการกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังมากขึ้น

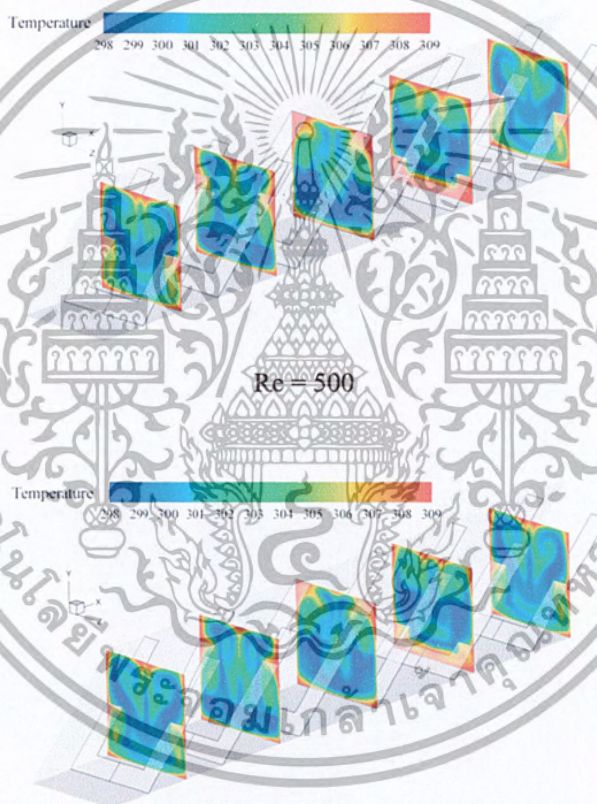


รูปที่ 5.25 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดครีรูปตัวยูที่ $BR = 0.20$ และมุม 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Re = 100



Re = 1000

รูปที่ 5.26 การกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลภายในท่อกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ค่า $BR = 0.20$ และมุม 45° ในระนาบขวางการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 การกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ค่า $BR = 0.20$ และมุม 45°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 อิทธิพลของค่าอัตราส่วนการบดอัด

พิจารณารูปที่ 5.28 แสดงเส้นกระแสการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่เลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 1000 โดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการบดอัดที่ $BR = 0.10, 0.20, 0.30$ และ 0.40 ตามลำดับ พบว่าเมื่อค่า BR เพิ่มขึ้นเส้นกระแสจะมีการไหลหมุนวนตามแกน x ที่มีความปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้น และวงของกระแสหมุนวนมีขนาดใหญ่ขึ้นดังรูป ทำให้มีพื้นที่ในการกวาดไปตามพื้นผิวถ่ายเทความร้อนมากขึ้น

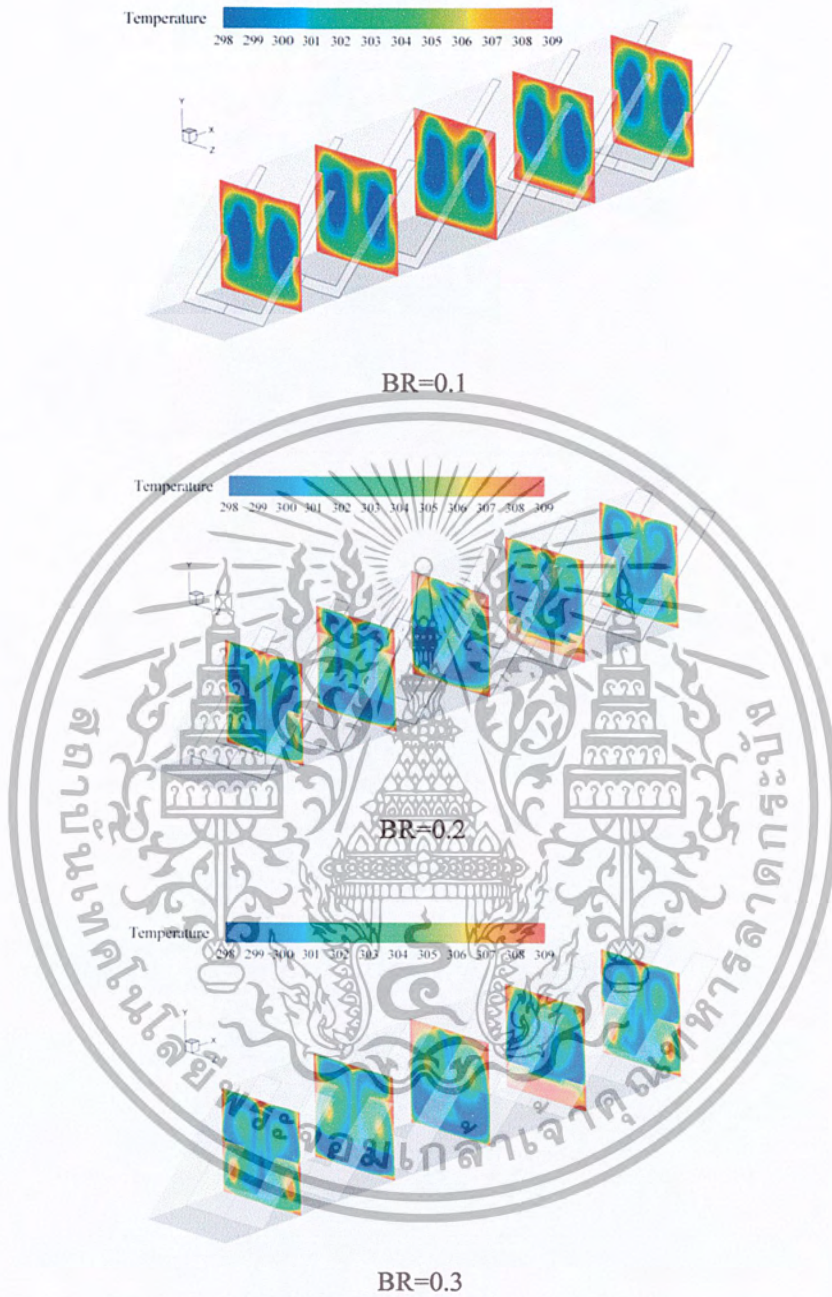
พิจารณารูปที่ 5.29 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลที่ไหลผ่านท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ $Re = 1000$ และมุม 45° โดยเปลี่ยนแปลงค่าเลข $BR = 0.10, 0.20$ และ 0.30 ตามลำดับพบว่าถ้าค่าเลขเรย์โนลด์ส์มากขึ้นส่งผลให้ของไหลมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังมากขึ้น สังเกตได้จากอุณหภูมิของไหลเย็นมีการเหนี่ยวนำไปยังผนังร้อนมากขึ้น

พิจารณารูปที่ 5.30 แสดงกระจายของเลขนัสเซลที่ผนังท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดครีบริบรูปตัวยูที่เลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 1000 โดยเปลี่ยนค่าอัตราส่วนการบดอัดที่ $BR = 0.10, 0.20$ และ 0.30 ตามลำดับ พบว่าเมื่อค่า BR เพิ่มมากขึ้นจะมีการกระจายของเลขนัสเซลที่ผนังมากขึ้น โดยที่ถ้า $BR = 0.30$ จะมีค่ามีการกระจายของเลขนัสเซลที่สูงที่สุด ตามด้วยกรณี $BR = 0.20$ และ $BR = 0.10$ ตามลำดับ



รูปที่ 5.28 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดแผ่นครึ่งรูปตัวยูที่ $Re = 1000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 การกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลภายในท่อกรณีติดแผ่นครีบริมรูปตัวยูที่ค่า $Re=1000$ ในระนาบขวางการไหล

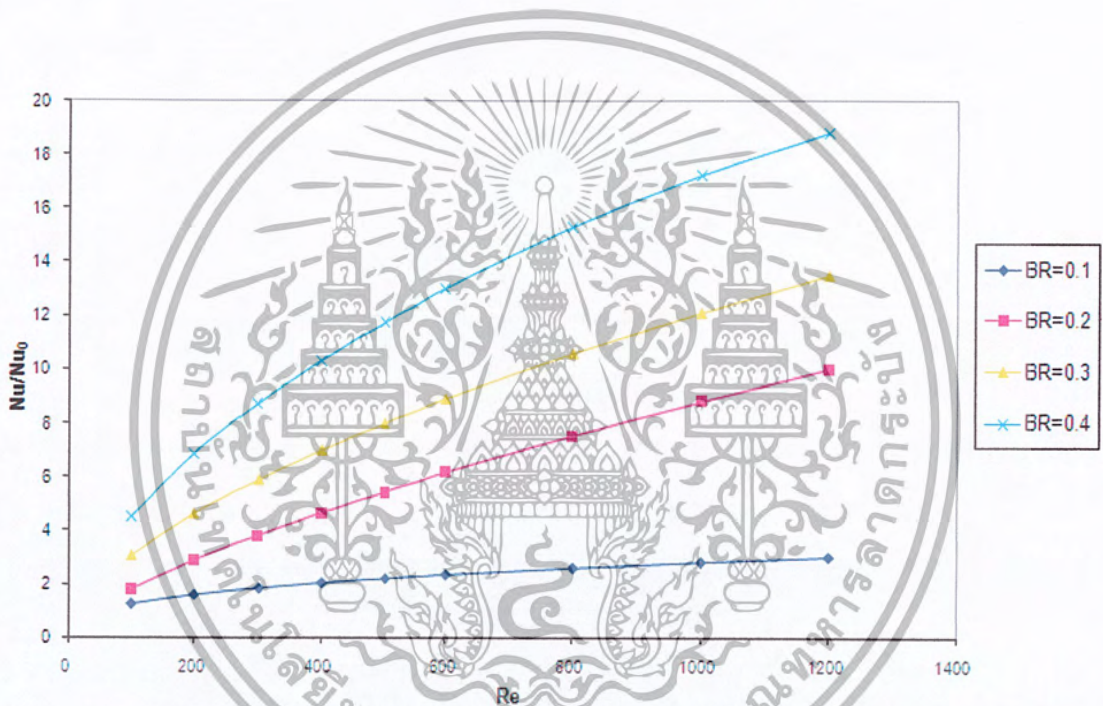
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 การกระจายของเลขนัสเซลท์ที่ผนังของท่อสี่เหลี่ยมกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ $Re = 1000$

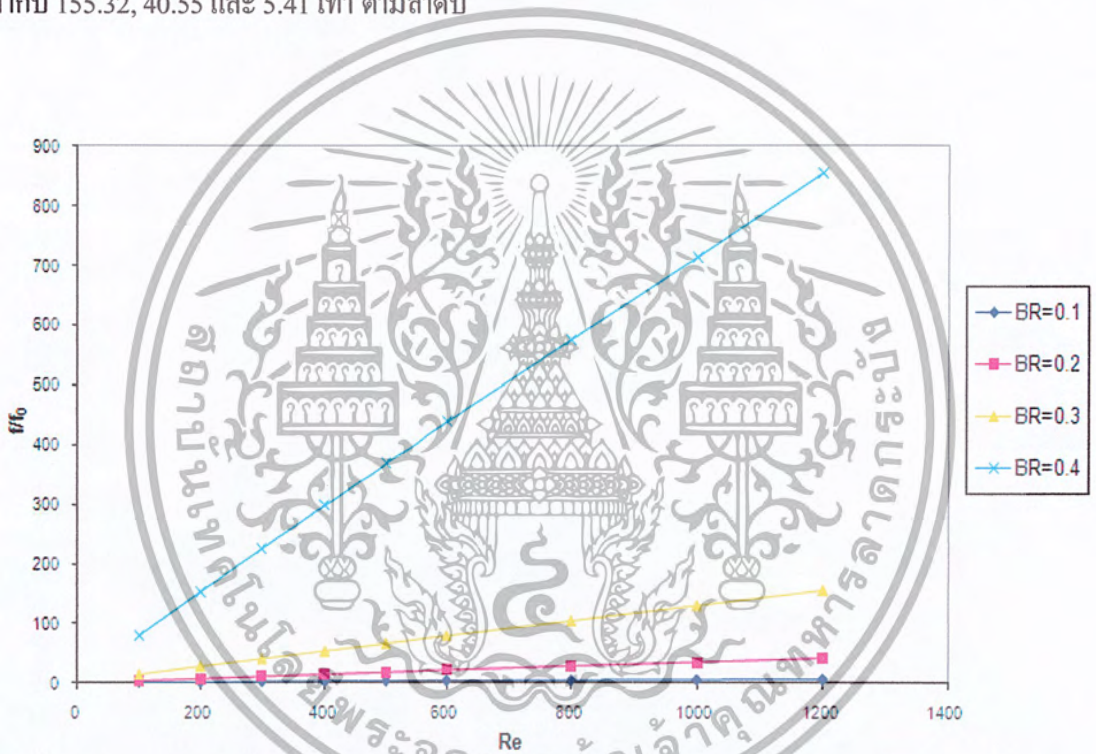
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ซึ่งพิจารณาเลขนัสเซลล์ท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีแผ่นครีบริบรูปตัวยูต่อเลขนัสเซลล์ท์ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาที่ $BR = 0.10, 0.20, 0.30$ และ 0.40 ตามลำดับ จากการจำลองพบว่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และยังพบว่าจากเลขเรย์โนลด์ส์ช่วง $100-1000$ กรณีค่า $BR = 0.40$ ให้อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์สูงที่สุดซึ่งมีค่า 18.80 เท่าของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ ตามด้วยกรณี $BR = 0.30, 0.20$ และ 0.10 ซึ่งให้ค่าเลขนัสเซลล์ท์ที่สูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ $12.60, 9.61$ และ 2.76 เท่าตามลำดับ



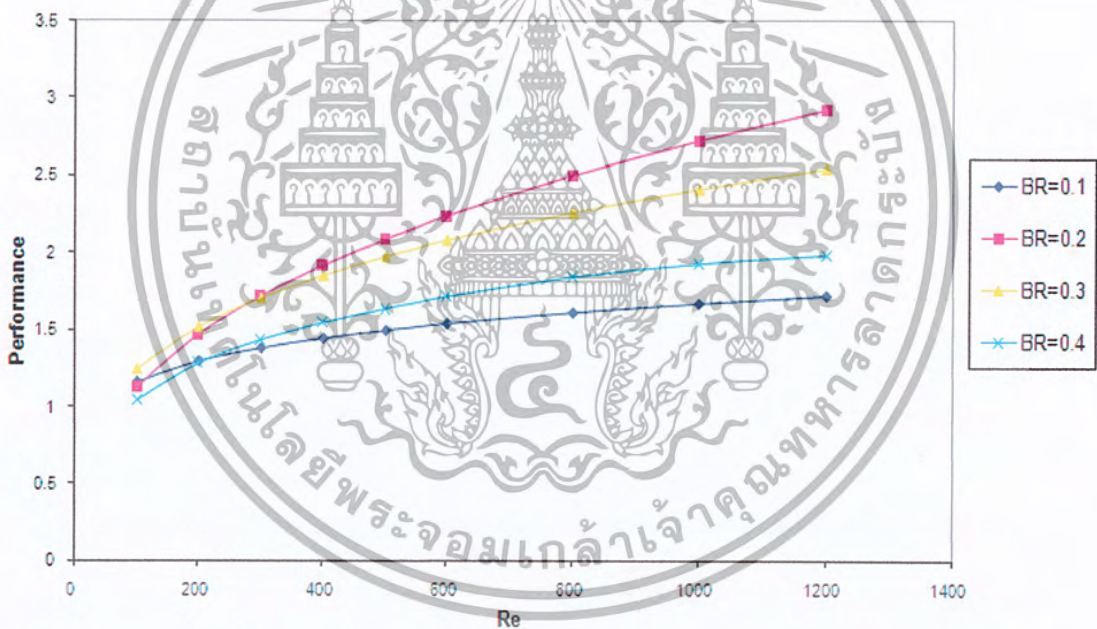
รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ค่า BR ต่างๆ

พิจารณารูปที่ 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานซึ่งพิจารณาตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบทัวยูต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ จากการจำลองท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบทัวยูที่ $BR = 0.10, 0.20, 0.30$ และ 0.40 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นทุกค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลอง กรณี $BR = 0.40$ จะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 854 เท่า ตามด้วยกรณีค่า $BR = 0.30, 0.20$ และ 0.10 ตามลำดับ โดยให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 155.32, 40.55 และ 5.41 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อติดแผ่นครีบทัวยูที่ค่า BR ต่างๆ

พิจารณารูปที่ 5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน, η กับเลขเรย์โนลด์ส์ของการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีคิดครีปรูปตัวยูที่ $BR = 0.10, 0.20, 0.30$ และ 0.40 ตามลำดับ พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีคิดแผ่นครีปรูปตัวยูที่ค่า BR ต่างๆ เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มสูงมากขึ้นทำให้เกิดการไหลหมุนวนมากขึ้นจึงมีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นเป็นผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้น และพบว่าจากช่วงค่าเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ กรณี $BR = 0.10$ ถ้าแผ่นครีบบมีอัตราส่วนการบิดค่อนน้อยๆ เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มสูงขึ้นกระแสการไหลส่วนใหญ่จะข้ามแผ่นครีบบไป ซึ่งเกิดการหมุนวนที่บริเวณด้านหลังแผ่นครีบบน้อยๆ ทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้อยจึงส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนลดลง และยังพบว่าจากช่วงค่าเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ กรณี $BR = 0.20$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.92 ตามด้วยกรณี $BR = 0.30, 0.40$ และ 0.10 ตามลำดับ โดยมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 2.54, 1.98 และ 1.57 ตามลำดับ



รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อคิดแผ่นครีปรูปตัวยูที่ค่า BR ต่างๆ

5.3.3 อิทธิพลของมุมปะทะ

พิจารณารูปที่ 5.34 แสดงเส้นกระแสการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ ที่ค่า $BR = 0.20$, $Re = 500$ ซึ่งเส้นกระแสไหลเข้าในทิศทางแกน $+x$ พบว่ากรณี $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° จะเกิดกระแสการไหลที่หมุนควง กระแสสวนทั้งสองจะเสริมกันแล้วตกกระทบบนผนังด้านซ้ายแล้วจึงแยกจากกันมาตกกระทบบนผนังด้านบนหรือด้านล่างที่ลูกกระแสการหมุนนั้น ติดจากช่วงมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ$ ถึง 45° เมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้นจะเกิดการไหลหมุนควงที่มีความปั่นป่วนมากขึ้นแล้วไปตกกระทบบนผนังที่มีความรุนแรงมากขึ้น และระยะทางที่ไปตกกระทบบนผนังจะสั้นลง สามารถสังเกตได้ว่าที่ $\alpha = 45^\circ$ จะมีกระแสการหมุนควงที่ปั่นป่วนมากกว่าและใช้ระยะทางในการไปตกกระทบบนผนังน้อยกว่าที่ $\alpha = 30^\circ$

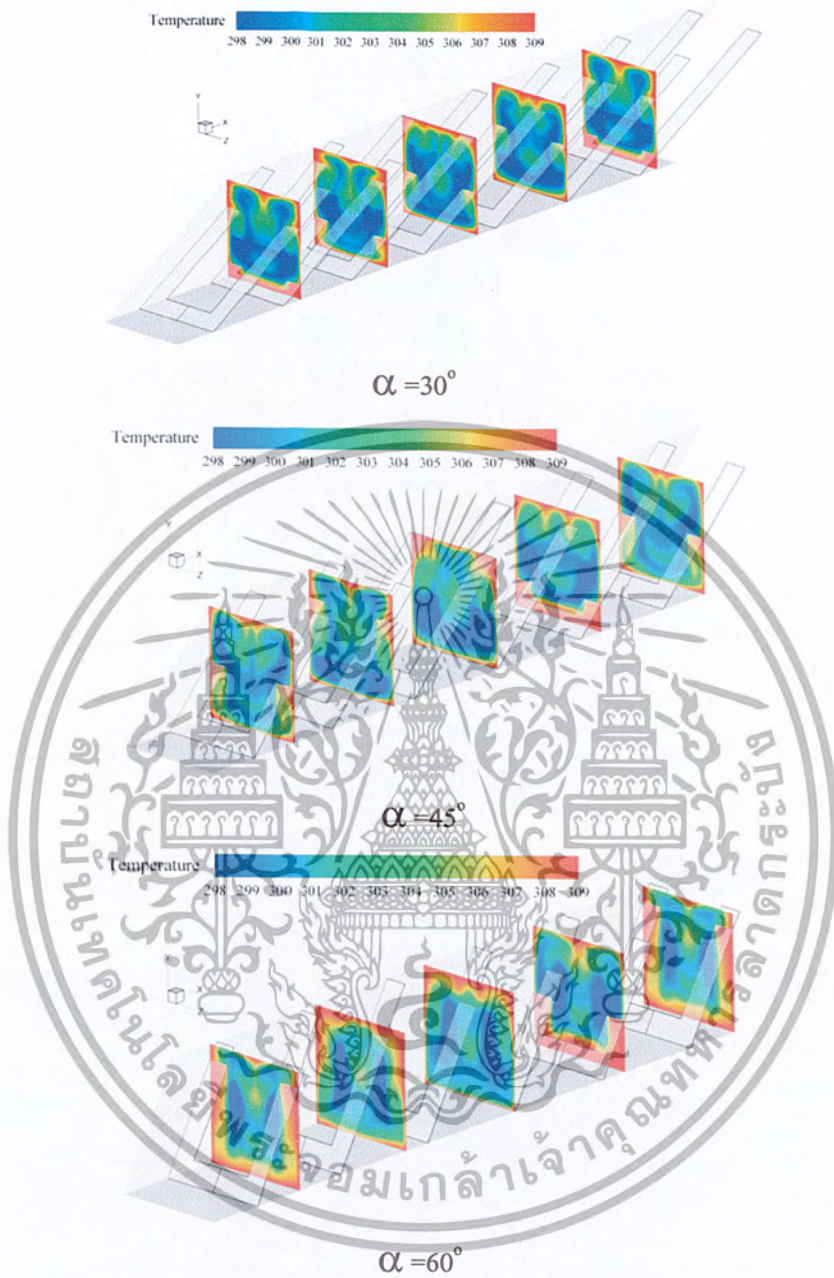
พิจารณารูปที่ 5.35 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลที่ไหลผ่านท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ $BR = 0.2$ และ $Re = 500$ โดยเปลี่ยนแปลงค่ามุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ พบว่าอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงมุมปะทะส่งผลให้ของไหลมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณผนังมากขึ้น สังเกตได้จากอุณหภูมิของไหลเย็นมีการเหนี่ยวนำไปยังผนังร้อนมากขึ้น จากการจำลองจะพบว่าที่ $\alpha = 45^\circ$ ของไหลเย็นจะเหนี่ยวนำลงไปกระทบบนผนังที่ร้อนมากที่สุด

พิจารณารูปที่ 5.36 แสดงการกระจายของเลขนัสเซิลที่ผนังท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ ที่ค่า $BR = 0.20$ และ $Re = 500$ พบว่าช่วง $\alpha = 30^\circ$ ถึง 45° จะมีการกระจายของเลขนัสเซิลที่บริเวณผนังด้านข้างสูงมากกว่าที่ผนังด้านอื่นๆ เมื่อค่ามุมปะทะเพิ่มขึ้นจะมีการกระจายของเลขนัสเซิลที่ผนังมากขึ้น ส่วนกรณี $\alpha = 60^\circ$ จะมีการกระจายของเลขนัสเซิลที่บริเวณผนังน้อยลงเนื่องจากของไหลไหลผ่านท่อได้ยากเกินไป และยังพบว่ากรณี $\alpha = 45^\circ$ ให้การกระจายของเลขนัสเซิลที่ผนังมากที่สุด ตามด้วยกรณี $\alpha = 60^\circ$ และ 30° ตามลำดับ



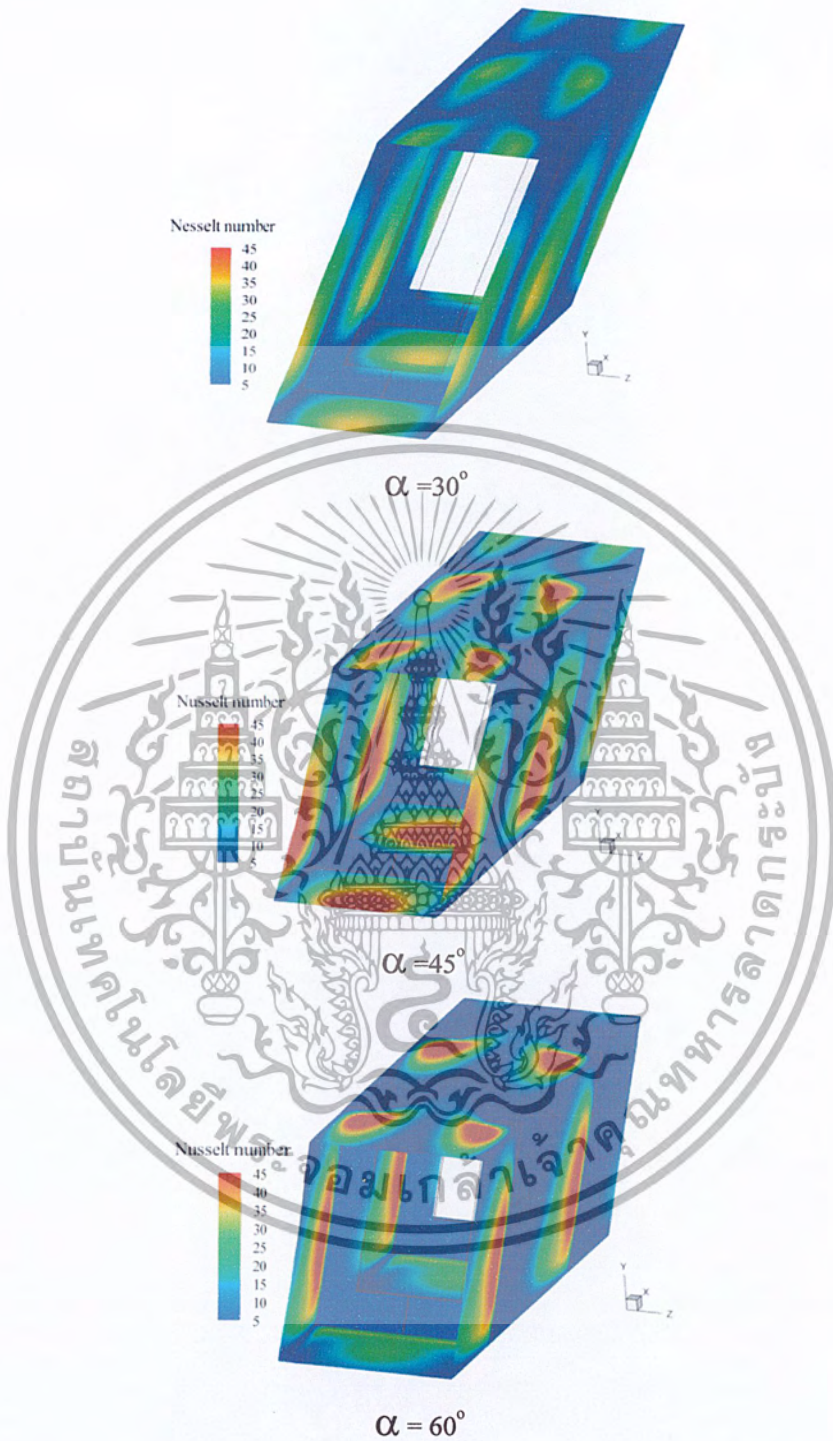
รูปที่ 5.34 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีคิดแผ่นครีบตัวยูที่มุมปะทะต่างๆ ที่ค่า $BR = 0.20$,
 $Re = 500$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.35 การกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลภายในท่อกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ค่า $Re=1000$ ในระนาบขวางการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.36 การกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นครีบตัวยูที่มุมปะทะต่างๆ ที่ค่า $BR = 0.20$, $Re = 500$

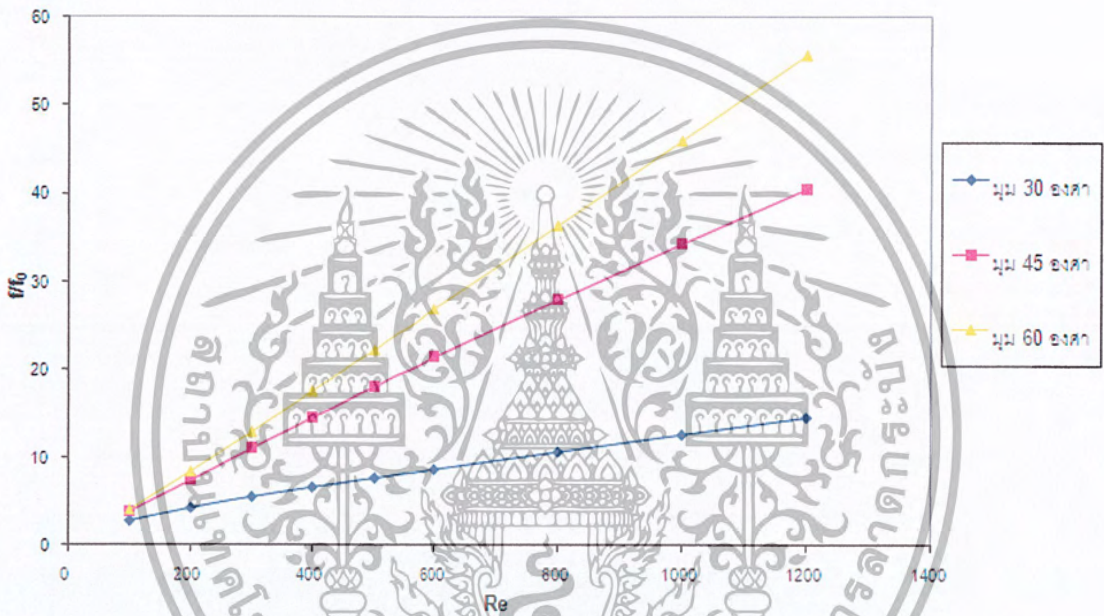
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 5.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัยเชิงลต์กับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูทำมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการบล็อก $BR = 0.20$ และ $PR = 1$ พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัยเชิงลต์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูทุกกรณีจะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัยเชิงลต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และยังคงพบว่ากรณี $\alpha = 45^\circ$ จะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัยเชิงลต์สูงสุดทุกค่าอัตราส่วนการบล็อกที่พิจารณา ตามด้วยกรณี $\alpha = 60^\circ$ และ 30° ตามลำดับ



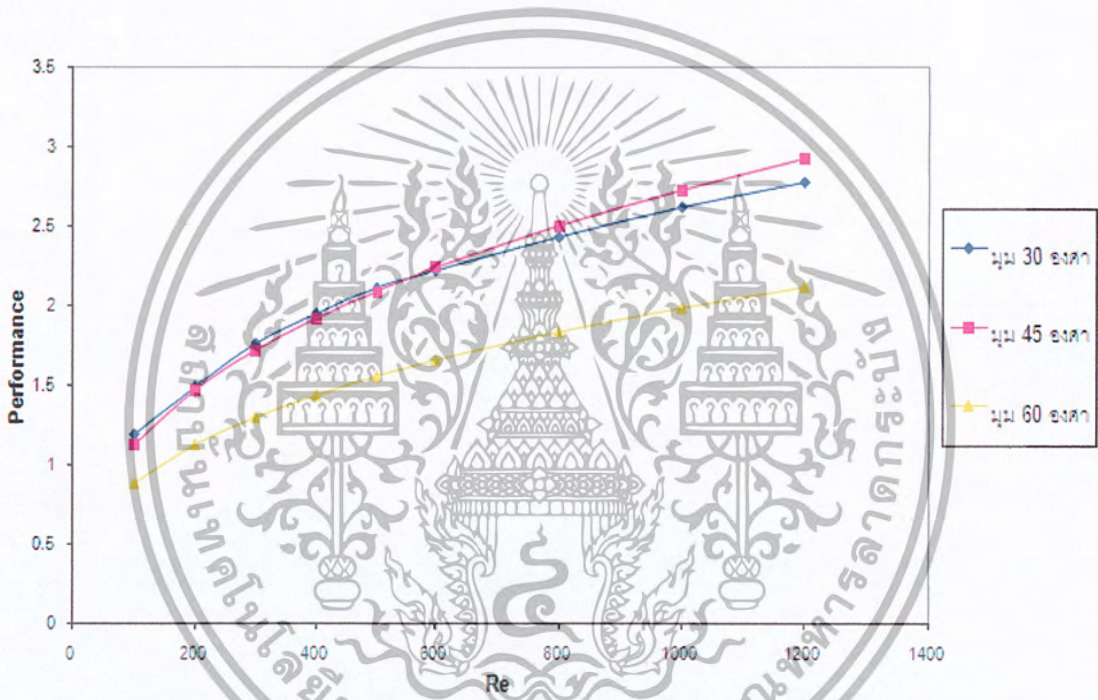
รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัยเชิงลต์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ

พิจารณารูปที่ 5.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่มุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการบล็อก $BR = 0.20$ และ $PR = 1$ พบว่าในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลองทุกกรณีมุมปะทะจะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ ซึ่งในกรณี $\alpha = 60^\circ$ ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงสุดในทุกอัตราส่วนการบล็อกที่พิจารณา ตามด้วยกรณี $\alpha = 45^\circ$ และ 30° ตามลำดับ



รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ

พิจารณารูปที่ 5.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (η) กับเลขเรย์โนลด์ส์ของการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูทำมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการบล็อก, $BR = 0.20$ และ $PR = 1$ พบว่าในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลองทุกกรณีมุมปะทะจะให้ค่า η เพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นและมีค่า η มากกว่าหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่มุมปะทะทั้งสามนี้ให้การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ และจะพบว่ากรณีมุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$ จะให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบถึง 2.91 เท่า



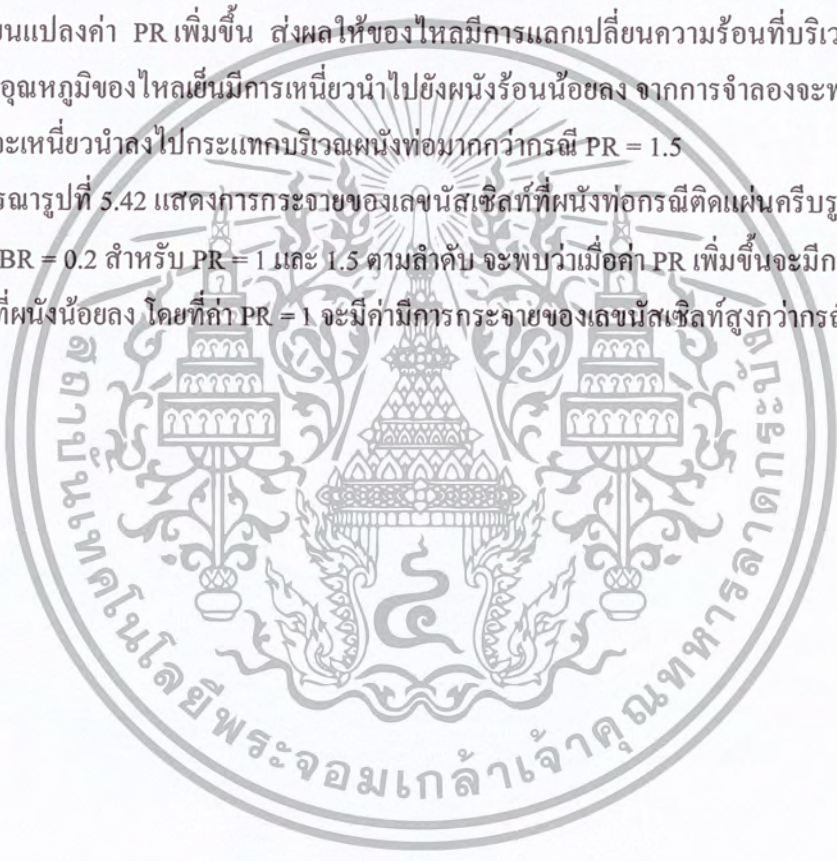
รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ ที่ $BR = 0.2$

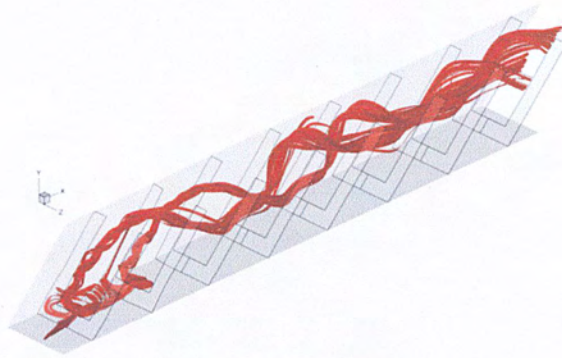
5.3.4 อิทธิพลของค่าระยะห่างระหว่างแผ่นครีป

พิจารณารูปที่ 5.40 แสดงเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดแผ่นครีปด้วยที่ PR ต่างๆ โดยที่มุมปะทะ $\alpha = 45^\circ$, $Re = 500$ และ $BR = 0.2$ ซึ่งเส้นกระแสไหลเข้าในทิศทางแกน $+x$ จะพบว่ากรณี $PR = 1$ จะเกิดกระแสการไหลที่หมุนควงที่ปั่นป่วนมากกว่าและใช้ระยะทางในการไปตกกระทบน้อยกว่ากรณี $PR = 1.5$

พิจารณารูปที่ 5.41 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลที่ไหลผ่านท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีปรูปตัวยูที่ $BR = 0.2$, $Re = 500$ และ $\alpha = 45^\circ$ สำหรับ $PR = 1$ และ 1.5 ตามลำดับ พบว่าอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่า PR เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ของไหลมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณผนังน้อยลง สังเกตได้จากอุณหภูมิของไหลเย็นมีการเหนี่ยวนำไปยังผนังร้อนน้อยลง จากการจำลองจะพบว่าที่ $PR = 1$ ของไหลเย็นจะเหนี่ยวนำลงไปกระแทกบริเวณผนังท่อมากกว่ากรณี $PR = 1.5$

พิจารณารูปที่ 5.42 แสดงการกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นครีปรูปตัวยูโดยที่ค่า $\alpha = 45^\circ$ และ $BR = 0.2$ สำหรับ $PR = 1$ และ 1.5 ตามลำดับ จะพบว่าเมื่อค่า PR เพิ่มขึ้นจะมีการกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังน้อยลง โดยที่ค่า $PR = 1$ จะมีค่ามีการกระจายของเลขนัสเซิลท์สูงกว่ากรณี $PR = 1.5$



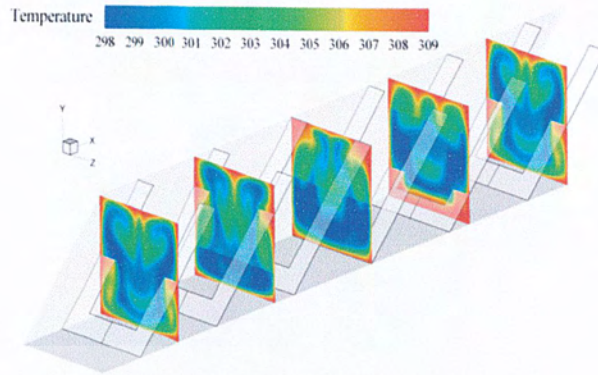


PR = 1



PR = 1.5

รูปที่ 5.40 ภาพสามมิติเส้นกระแสการไหลในท่อกรณีติดแผ่นครีบด้วยที่ PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$, $Re = 500$ และ $BR = 0.2$

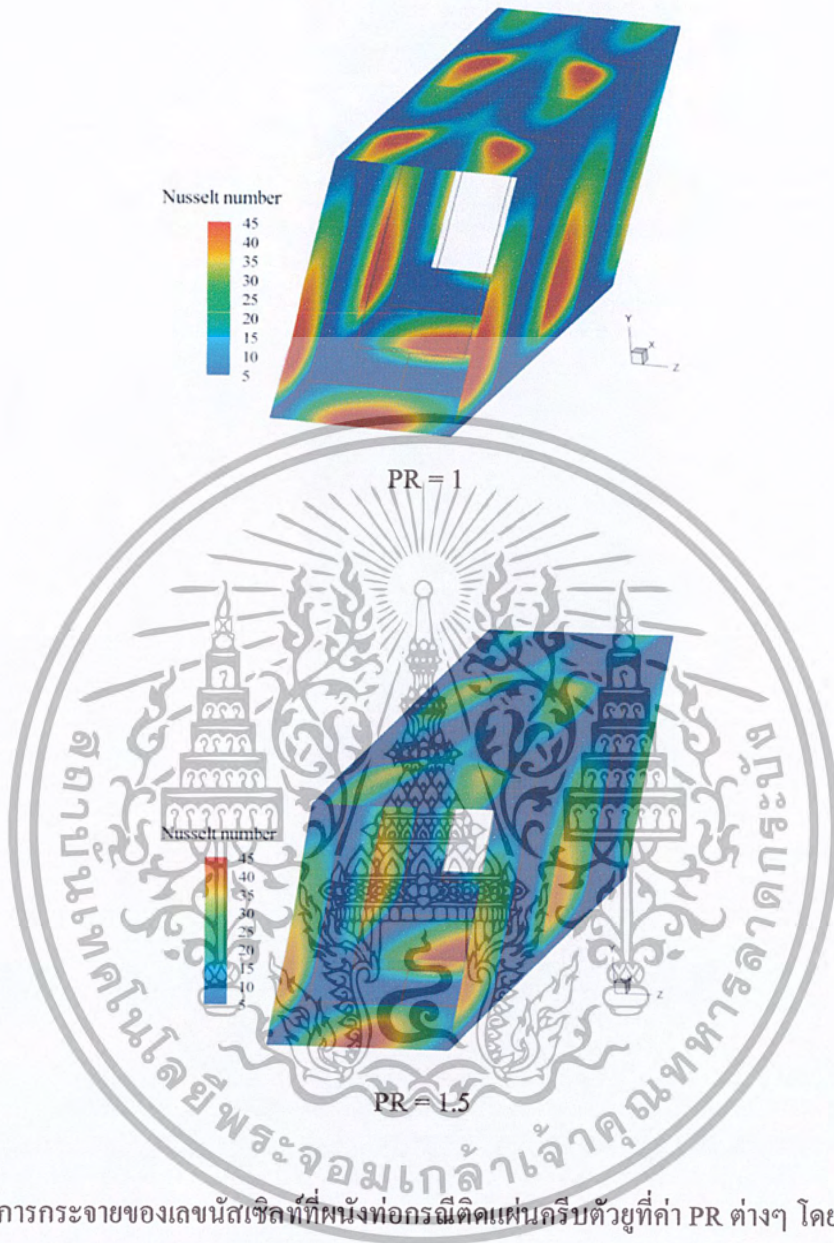


PR = 1



PR = 1.5

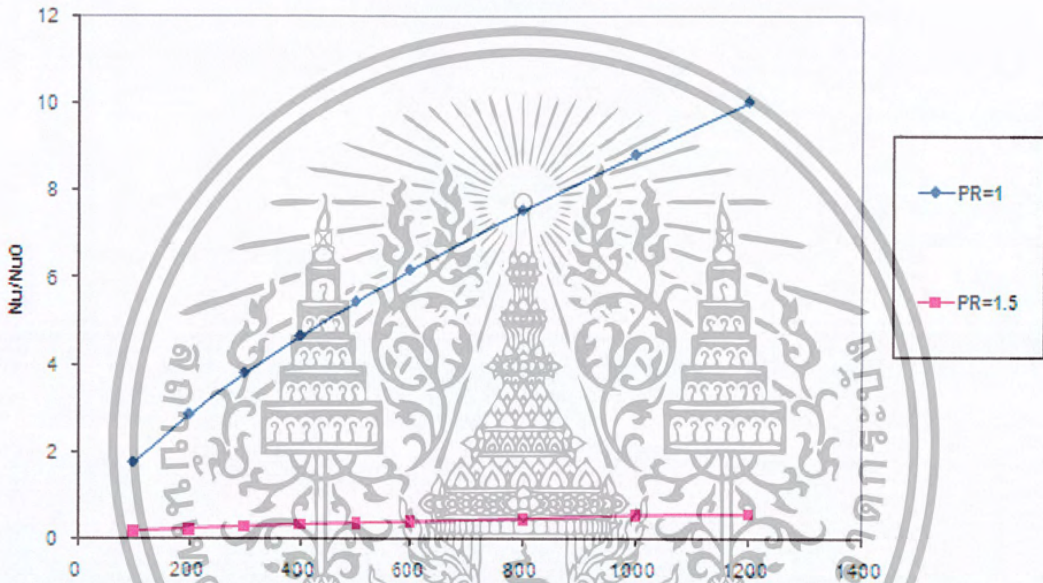
รูปที่ 5.41 การกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลภายในท่อกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ค่า PR ต่างๆที่ $\alpha = 45^\circ$, $Re = 500$ และ $BR = 0.2$ ในระนาบขวางการไหล



รูปที่ 5.42 การกระจายของเลขนัสเซิลที่ผนังท่อกรณีติดแผ่นครีบด้วยที่ค่า PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$, $Re = 500$ และ $BR = 0.2$

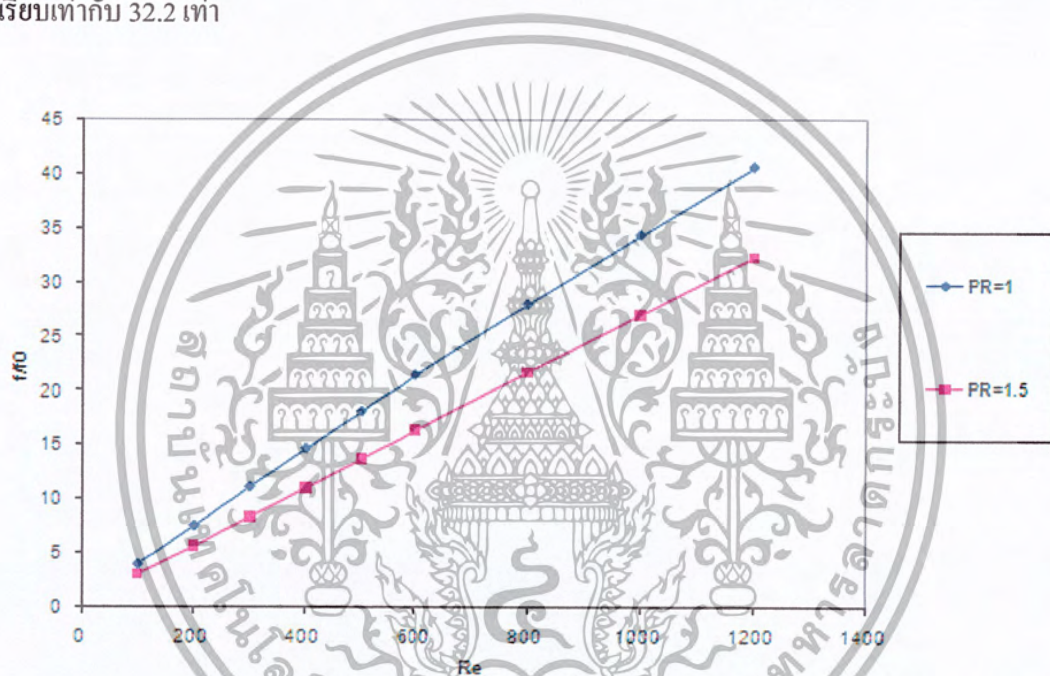
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 5.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัยเซิลท์กับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ค่า $PR = 1$ และ 1.5 โดยมีอัตราส่วนการบล็อก $BR = 0.20$, $\alpha = 45^\circ$ พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัยเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูทุกกรณีจะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัยเซิลท์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และยังคงพบว่ากรณี $PR = 1$ จะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัยเซิลท์สูงที่สุดทุกค่าอัตราส่วนการบล็อกที่พิจารณาตามด้วยกรณี $PR = 1.5$



รูปที่ 5.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัยเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ค่า PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$ และ $BR = 0.2$

พิจารณารูปที่ 5.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานซึ่งพิจารณาตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบทัวต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ จากการจำลองท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบทัวที่ $PR = 1$ และ 1.5 โดยมีอัตราส่วนการบล็อก $BR = 0.20$ และ $\alpha = 45^\circ$ พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น ทุกค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลอง กรณีที่ $PR = 1$ จะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 40.55 เท่า ตามด้วยกรณี $PR = 1.5$ โดยให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 32.2 เท่า



รูปที่ 5.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ค่า PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$ และ $BR = 0.2$

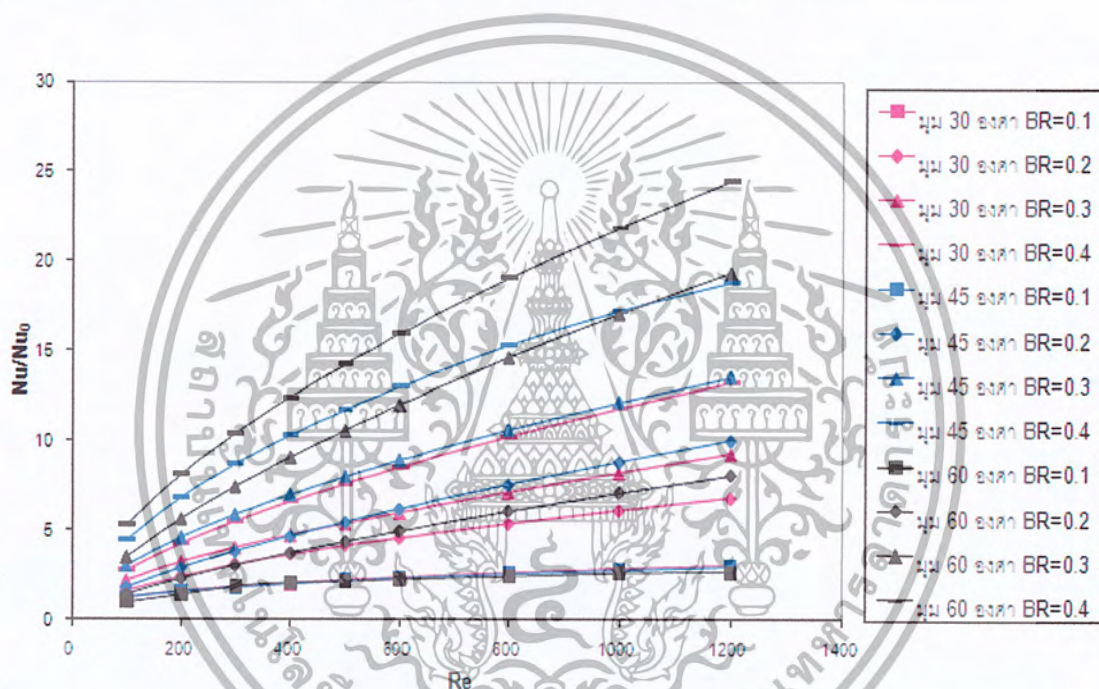
พิจารณารูปที่ 5.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน, η กับเลขเรย์โนลด์ส์ของการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดครีปรูปตัวยูที่ $PR = 1$ และ 1.5 โดยมีอัตราส่วนการบล็อก $BR = 0.20$ และ $\alpha = 45^\circ$ พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีปรูปตัวยูที่ค่า PR ต่างกัน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มสูงมากขึ้นทำให้เกิดการไหลหมุนวนมากขึ้นจึงมีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นเป็นผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้น ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ากรณี $PR = 1$ จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่ากรณี $PR = 1.5$ ทุกค่าเลขเรย์โนลด์ส์ ซึ่งกรณี $PR = 1$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.92



รูปที่ 5.45 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ค่า PR ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 45^\circ$ และ $BR = 0.2$

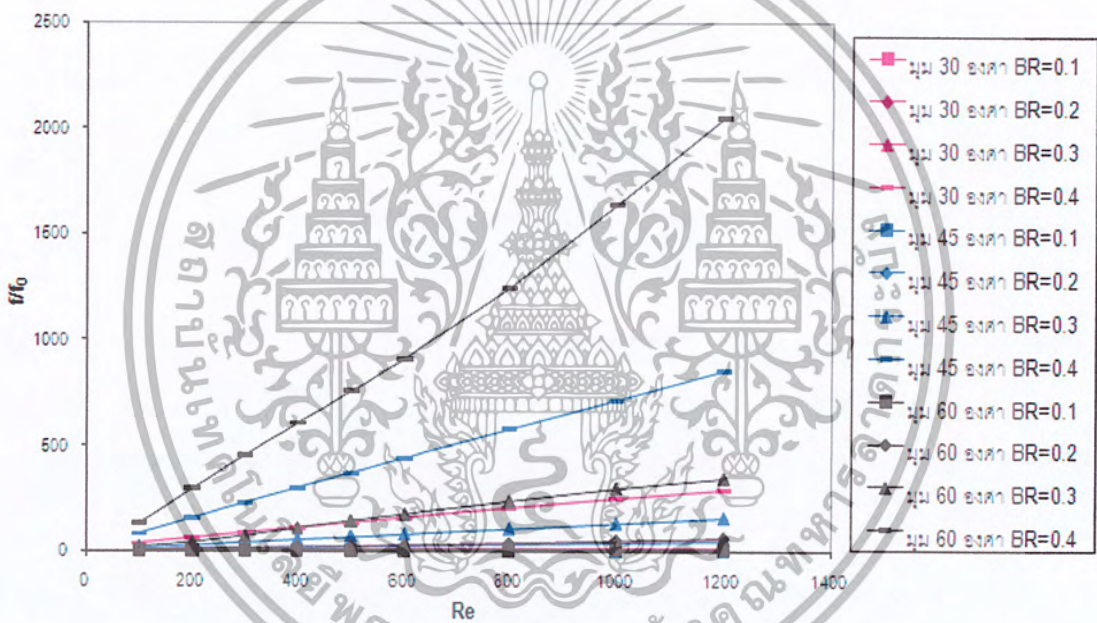
5.3.5 วิเคราะห์ผลข้อมูลทั้งหมดของครีบริปตัวยู

พิจารณารูปที่ 5.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์กับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริปตัวยูทำมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการบล็อก $BR = 0.10, 0.20, 0.30$ และ 0.40 ตามลำดับโดยที่ค่า $PR = 1$ พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริปตัวยูทุกกรณีจะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และยังพบว่ากรณี $\alpha = 60^\circ$ และ $BR = 0.4$ จะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์ที่สูงที่สุดทุกค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่พิจารณา ให้ซึ่งมีค่า 24.49 เท่าของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ



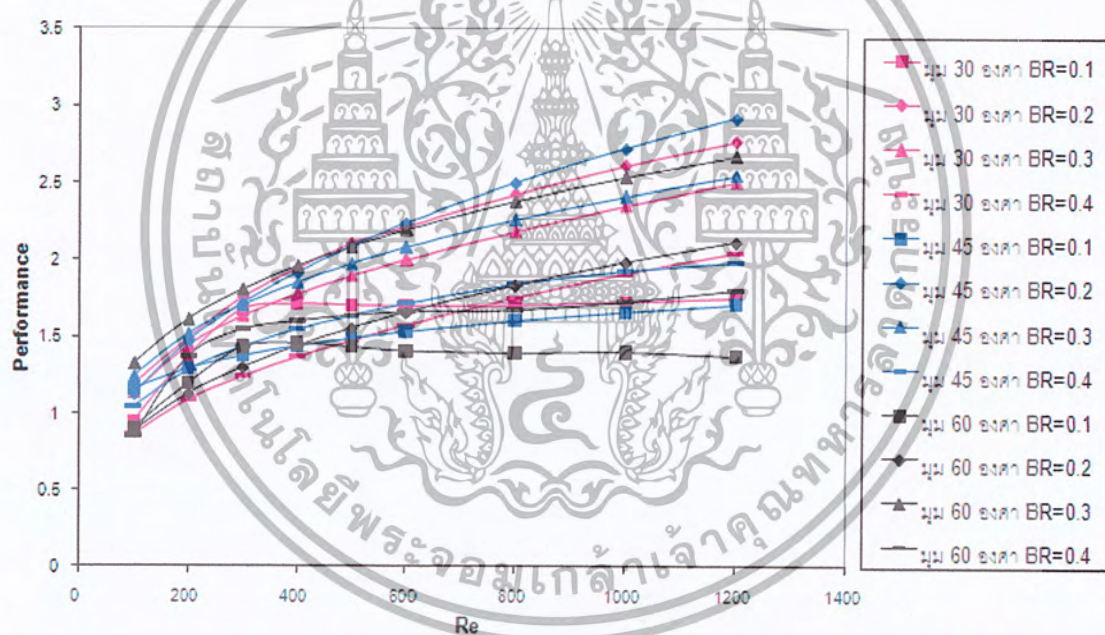
รูปที่ 5.46 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะและค่า BR ต่างๆ โดยที่ $PR = 1$

พิจารณารูปที่ 5.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานซึ่งพิจารณาตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบทัวต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ จากการจำลองท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบทัวด้วยที่ $BR = 0.10, 0.20, 0.30$ และ 0.40 ตามลำดับ และที่ค่ามุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นทุกค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลอง และจะพบว่ากรณีที่ $\alpha = 60^\circ$ และ $BR = 0.40$ จะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 2049 เท่า ตามด้วยกรณี และ $\alpha = 45^\circ$ และ $BR = 0.40$ โดยให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 854 เท่า



รูปที่ 5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะ และค่า BR ต่างๆ โดยที่ $PR = 1$

พิจารณารูปที่ 5.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน, η กับเลขเรย์โนลด์ส์ของการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดครีบริบรูปตัวยูที่ $BR = 0.10, 0.20, 0.30$ และ 0.40 ตามลำดับและค่ามุมปะทะ $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบริบรูปตัวยูที่ค่า BR และค่า α ต่างๆ เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มสูงมากขึ้นทำให้เกิดการไหลหมุนวนมากขึ้นจึงมีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นเป็นผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้น และพบว่าจากช่วงค่าเรย์โนลด์ส์ที่ใช้กรณี $BR = 0.10$ ถ้าแผ่นครีบริบมีอัตราส่วนการบดเล็กน้อย เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มสูงขึ้นกระแสการไหลส่วนใหญ่จะข้ามแผ่นครีบริบไป ซึ่งเกิดการหมุนวนที่บริเวณด้านหลังแผ่นครีบริบน้อยทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้อยจึงส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนลดลง และยังพบว่าจากช่วงค่าเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ กรณี $\alpha = 45^\circ$ และ $BR = 0.20$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.92 ตามด้วยกรณี กรณี $\alpha = 30^\circ$ และ $BR = 0.20$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าเท่ากับ 2.77



รูปที่ 5.48 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะและค่า BR ต่างๆ โดยที่ $PR = 1$

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส์จะทำให้อัตราส่วนเลขนัสเซิลที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่สูงขึ้น

อิทธิพลของอัตราส่วนความสูงของแผ่นครีบอกความสูงของท่อ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อขนาดของอัตราส่วนความสูงของแผ่นครีบอกความสูงของท่อ (BR) มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า $BR = 0.25$ จะมีค่าการกระจายของเลขนัสเซิลที่สูงที่สุด แต่กลับส่งผลให้มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดจึงส่งผลให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนต่ำ ซึ่งจากการทดลองกรณี $BR = 0.20$ จะให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.32

อิทธิพลของมุมปะทะ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมุมเพิ่มขึ้นจะมีการกระจายของเลขนัสเซิลที่พื้นผนังเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า $\alpha = 60^\circ$ จะมีค่ามีการกระจายของเลขนัสเซิลที่สูงที่สุด แต่จะทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดเช่นกัน จึงส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนต่ำ ซึ่งจากการทดลองกรณีมุมปะทะ $\alpha = 30^\circ$ จะให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.52

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นครีบอก พบว่าเมื่อค่า PR เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้มีการกระจายของเลขนัสเซิลที่พื้นผนังน้อยลง โดยที่ค่า $PR = 1$ จะมีค่ามีการกระจายของเลขนัสเซิลที่สูงที่สุดและจะพบว่ากรณี $PR = 1$ จะให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.23

6.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลของการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดแผ่นครีบอกแบบต่างๆ สามารถใช้เป็นเครื่องมือเพื่อการวิเคราะห์ผลและย้ำความมั่นใจ ก่อนเข้าสู่กระบวนการออกแบบจริงได้ ซึ่งมีความสะดวกและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการสร้างเครื่องทดลองเพื่อใช้ในการทดลอง สำหรับผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและออกแบบกรณีติดแผ่นครีบอกเชิงภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความเหมาะสมได้

สามารถนำไปเป็นแนวทางในการวิจัยระดับสูงต่อไป เช่น การศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อจัตุรัสที่มีแผ่นครีบอกโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในการคำนวณสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแบบอย่างในการจัดวางของแผ่นครีบอกแบบอื่นๆ เป็นต้น ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำการจำลองนั้นผลที่ได้ไม่สามารถทราบล่วงหน้าได้ ดังนั้นในการทำวิจัยสำหรับการจำลองควรที่จะปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ อย่างละเอียด อย่างมีระบบ มีแบบแผน จะทำให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีเหมาะสมกับลักษณะงานที่ใช้ที่สุดได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Sripattanapipat. S. and Promvonge. P. 2009. Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol.36: 32-38.
- [2] 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*, Vol.99: 180-186.
- [3] Kelkar. K.M. and Patankar. S.V. 1987. Numerical prediction of flow and heat transfer in a parallel plate channel with staggered fins, *ASME J. Heat Transfer*, Vol.109: 25–30.
- [4] Patankar. S.V. 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.
- [5] Incropera. F. and Dewitt. P.D. 1996. *Introduction to heat transfer*, 3rd edition John Wiley & Sons Inc.

