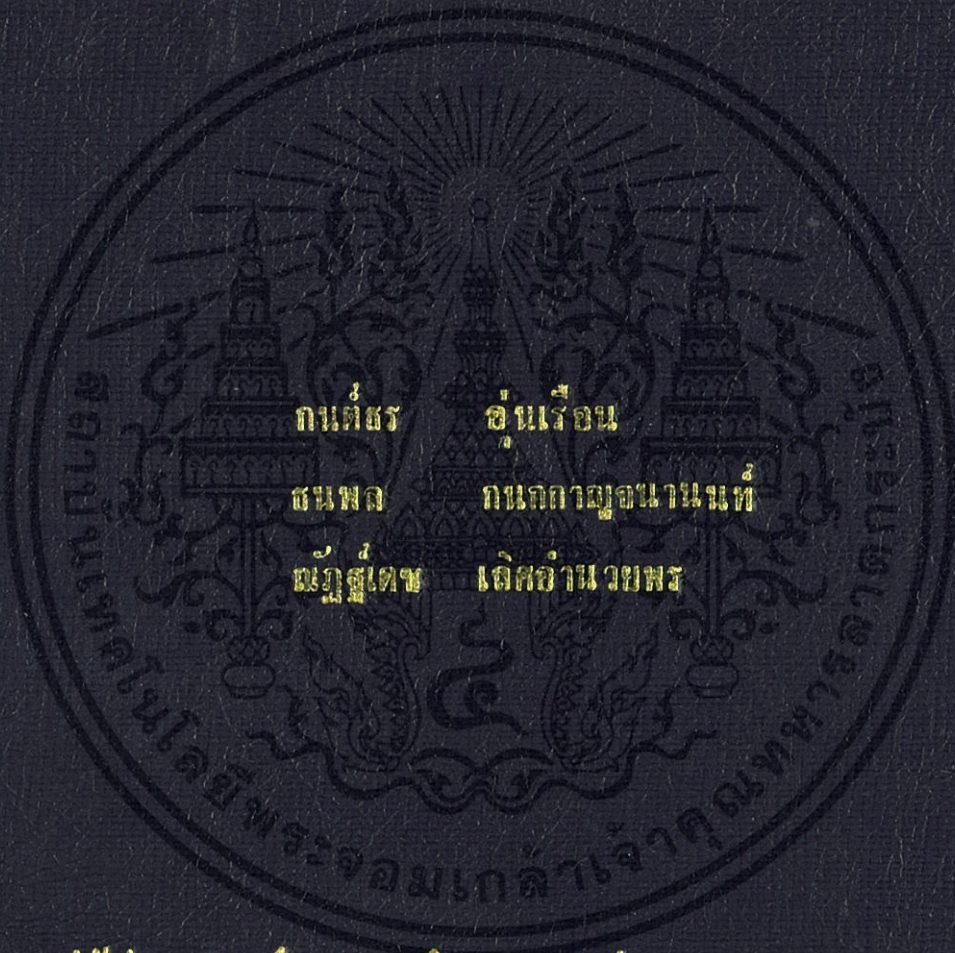


การศึกษาเชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบ  
3 มิติในท่อด้วยครีบริบแบบแยกตัว

3D Numerical Simulation for Flow Behaviors and  
Heat Transfer in duct with V-Discrete Rib



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

การศึกษาเชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบ  
3 มิติในท่อด้วยครีบริบตัววีแบบแยกตัว

3D Numerical Simulation for Flow Behaviors and  
Heat Transfer in duct with V-Discrete Rib



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3D Numerical Simulation for Flow Behaviors and  
Heat Transfer in duct with V-Discrete Rib



Konthron Uoonreun  
Thanapon Kanokkarnjananon  
Nattadeach Lerdumnuyporn

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

2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบ 3 มิติในท่อด้วย  
ครีบบตั้ววีแบบแยกตัว

3D Numerical Simulation for Flow Behaviors and Heat Transfer in duct with  
V-Discrete Rib

ผู้จัดทำ

1. นายกนต์ธร อุ่นเรือน รหัสประจำตัว 52010007
2. นายธนพล กนกกาญจนานนท์ รหัสประจำตัว 52010448
3. นายณัฐเดช เลิศอำนวยพร รหัสประจำตัว 52010608

วิฑิต เจษฎารัตนชัย

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.วิฑิตา เจษฎารัตนชัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบ 3 มิติ ในท่อด้วยครีบริ้ว  
แบบแยกตัว

นายกนต์ธร	อุ้นเรือน	52010007
นายธนพล	กนกกาญจนานนท์	52010448
นายณัฐเดช	เลิศอำนวยพร	52010608
ดร.วิฑาดา	เจษฎารัตนชัย	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2555

### บทคัดย่อ

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบสามมิติของการถ่ายเทความร้อนในช่วงการไหลแบบราบเรียบในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลมที่มีการติดตั้งครีบริ้วแบบแยกตัวเอียงทำมุม กำหนดให้ผิวท่อมี่ลักษณะแบบอนุกรมที่ผิววงที่ โดยได้มีการติดตั้งครีบริ้วแบบแยกตัวให้มีลักษณะการจัดวางเอียงทำมุมปะทะที่  $\alpha = 30^\circ$  และ  $45^\circ$  โดยครีบริ้วแบบแยกตัวมีการจัดวางแบบปลายวีชี้ตามการไหล (V-downstream) และปลายวีชี้ทวนการไหล (V-upstream) และมีอัตราส่วนระหว่างความสูงของครีบริ้วแบบแยกตัวต่อความสูงของท่อ (Blockage ratio, BR) เท่ากับ 0.05, 0.1, 0.15 และ 0.2 ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นครีบริ้วต่อความสูงท่อ (Pitch ratio, PR) เท่ากับ 1 และ 1.5 ซึ่งการจำลองนี้ได้นำเสนอคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของของไหลสำหรับเลขเรย์โนลด์บนพื้นฐานเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลม ภายในช่วงเรย์โนลด์เท่ากับ 100 ถึง 1200 และได้ศึกษาครีบริ้วแบบแยกตัวที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลม ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์ (Nu) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) ระหว่างท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบกับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทำการติดตั้งครีบริ้วแบบแยกตัว และระหว่างท่อกลมผิวเรียบกับท่อกลมที่ติดตั้งครีบริ้วแบบแยกตัว ผลที่ได้ถูกแสดงในรูปของการถ่ายเทความร้อน ( $Nu/Nu_0$  กับ Re), การสูญเสียความดัน ( $f/f_0$  กับ Re) และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF กับ Re) โดยในแต่ละความสัมพันธ์จะถูกนำไปพิจารณาถึงอิทธิพลต่างๆ (อิทธิพลของมุมปะทะ, อิทธิพลอัตราส่วนการบล็อก, อิทธิพลของค่าระยะห่างแผ่นครีบริ้ว, อิทธิพลของทิศทางการไหล และอิทธิพลของท่อกลมและท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3D Numerical Simulation for Flow Behaviors and Heat Transfer in duct with V-Discrete Rib

Konthron	Uoonreun	52010007
Thanapon	Kanokkarnjananon	52010448
Nattadeach	Lerdumnuyporn	52010608
Dr.Withada	Jedsadaratanachai	Advisor
YEAR 2555		

ABSTRACT

Numerical Analysis of heat transfer during the Laminar flow in square duct and circle tube that have been installed the V-discrete rib in separated italic angled. Consider the surface of the tube has constant temperature which installed the V-discrete rib in the angles of  $\alpha = 30^\circ$  and  $45^\circ$  and the baffle V-discrete rib in the study is pointing on both downstream (V-downstream) and upstream (V-upstream). The ratio between the height of the fin and the height of the tube (Blockage ratio , BR) are 0.05, 0.1, 0.15 and 0.2 respectively. The ratio of the difference between the height of the fin and the height of the tube (Pitch ratio , PR) are 1 and 1.5. This simulation presents the characteristic in heat transfer and the flow of fluids for Reynolds number base on the hydraulic diameter of a square duct and circle tube in 100 to 1200 . Also study about the V-discrete rib that influent the heat transfer and pressure loss in the square duct and circle tube. The results will be compared in (Nusselt number,  $Nu$ ), (Friction factor,  $f$ ) and (Thermal enchantment factor, TEF) between the square duct and circle tube. Which made the installation of the separated italic angles fin and between smooth circle tube and the circle tube with the fin? From the graph, results of installing the separated V-discrete rib in square duct and circle tube. The V-discrete which the V-tip is positioned along the flow and against the flow, By increasing the heat transfer rate, the result shows that the separated V-discrete in all case studies will increase the value of heat transfer and also the pressure when compare with the smooth-surface tube. The capacity of heat transfer will increase if Raynold's number increases. The ratio of the distance between the fin and tube's height (Pitch ratio , PR) has 1 and 1.5. The results are presented in term of  $Nu/Nu_0$ ,  $f/f_0$  and TEF. In each relationship will be consider

various parameter, include attach angle, blockage ratio, pitch ratio, flow direction and shape of tube (square, circular).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการศึกษาเชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบ 3 มิติ ในท่อด้วยครีบทวีแบบแยกตัวสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยการให้คำปรึกษาและความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโทวิฑาดา เจษฎารัตนชัย ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงอีกทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญาโท วิชาศาสตราจารย์ ดร.จรรูวัตร เจริญสุข ดร.เอกพจน์ ตันตราภิววัฒน์ และ อาจารย์สยามสงวนรัมย์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมทำให้ปริญญาโทนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณพี่ป.โท CFD LAB ทุกคน ที่ให้ความกรุณาในการสอนโปรแกรมและให้คำแนะนำที่ดีแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ทุนสนับสนุนการทำปริญญาโท ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และสถานที่สำหรับการวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆน้องๆร่วมสถาบันทุกท่านจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านที่ทำให้ปริญญาโทสำเร็จไปด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาโทฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายกนต์ธร อุ่นเรือน  
นายธนพล กนกกาญจนานนท์  
นายณัฐเดช เลิศอำนวยพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	IV
สารบัญ .....	V
สารบัญตาราง .....	VIII
สารบัญรูป .....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์ .....	XI
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย .....	3
1.6 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย และการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล .....	10
3.1 บทนำ .....	10
3.2 การไหลของของไหล .....	10
3.2.1 สภาวะการไหล .....	10
3.2.2 ความเร็วเฉลี่ย .....	11
3.2.3 รูปร่างความเร็วของการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว .....	12
3.2.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทาน ในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว .....	14
3.3 การถ่ายเทความร้อน .....	15
3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย .....	16
3.3.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้ว .....	17
3.4 การสมดุลของพลังงาน .....	20
3.4.1 กรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ .....	21
3.4.2 กรณีอุณหภูมิที่ผิวคงที่ .....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 สหพันธ์การพาความร้อนสำหรับท่อที่ไม่กลม .....	23
3.6 สมรรถนะเชิงความร้อน.....	24
3.7 การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล .....	25
3.8 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	25
3.9 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล .....	25
3.9.1 ชั้นก่อนประมวลผล .....	25
3.9.2 ชั้นประมวลผล.....	26
3.9.3 ชั้นแสดงผล.....	26
3.10 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	26
3.10.1 ความเข้ากันได้.....	27
3.10.2 เสถียรภาพการคำนวณ .....	27
3.10.3 การลู่เข้าของผลเฉลย.....	27
3.10.4 การอนุรักษ์.....	27
3.10.5 ความจำกัดขอบ.....	28
3.10.6 ความเสมือนจริง.....	28
3.10.7 ความแน่นอน.....	28
3.11 รูปแบบการจัดวางกริด.....	29
บทที่ 4 การกำหนดปัญหาและตรวจสอบผลการคำนวณ .....	31
4.1 บทนำ.....	31
4.2 สมการควบคุมและสมมติฐาน.....	31
4.3 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย.....	32
4.4 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ.....	36
4.5 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำ.....	37
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย .....	40
5.1 บทนำ.....	40
5.2 แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัว .....	40
5.2.1 อิทธิพลของค่าอัตราส่วนการบล็อก.....	41
5.2.2 อิทธิพลของมุมปะทะ .....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.3 อิทธิพลของค่าระยะห่างระหว่างแผ่นคริสป .....	49
5.2.4 อิทธิพลของทิศทางการไหล .....	52
5.2.5 อิทธิพลของรูปแบบท่อ .....	56
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	59
6.1 สรุปผลการศึกษา .....	59
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	59
บรรณานุกรม .....	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่า $Nu_D$ และ $f$ สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ในท่อพื้นที่หน้าตัดต่างกัน.....	24
4.1 ลักษณะกรณีศึกษาของ V-Discrete ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส V-downstream .....	34
4.2 ลักษณะกรณีศึกษาของ V-Discrete ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส V-upstream .....	35
4.3 ลักษณะกรณีศึกษาของ V-Discrete ในท่อกลม V-downstream .....	35
4.4 ลักษณะกรณีศึกษาของ V-Discrete ในท่อกลม V-upstream.....	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา<sup>viii</sup>เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 การก่อตัวของบาวนด์คาร์เลเยอร์ของการไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม	10
3.2 สมดุลแรงบนอิลิเมนต์ $dx$ สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ก่อตัวเต็มที่ในท่อกลม	12
3.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม	15
3.4 การก่อตัวของบาวนด์คาร์เลเยอร์ทางความร้อนในท่อกลม	15
3.5 การเปลี่ยนแปลงตามแกน $h$ สำหรับการไหลภายในท่อ	19
3.6 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ	20
3.7 ความเชื่อมโยงของกระบวนการดิสเครทีทและผลเฉลยประมาณค่า	26
3.8 แนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ	28
3.9 รูปแบบการจัดวางกริดในแกน 2 มิติ และ 3 มิติ	29
3.10 ส่วนแรเงาแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ	29
4.1 แบบจำลองสามมิติของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใส่แผ่นบางติดครีบริปูตัววีแบบแยกตัว	32
4.2 แบบจำลองสามมิติของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใส่แผ่นบางติดครีบริปูตัววีแบบแยกตัว	33
4.3 การเปรียบเทียบค่าเลขนัสเชิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบระหว่างผลเฉลย แม่นยำตรงกับผลที่ได้จากการจำลอง	37
4.4 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ ระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับค่าที่ได้จากการจำลอง	38
4.5 การเปรียบเทียบค่าเลขนัสเชิลท์ของท่อกลมผิวเรียบระหว่างผลเฉลย แม่นยำตรงกับผลที่ได้จากการจำลอง	39
4.6 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ ระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับค่าที่ได้จากการจำลอง	39
5.1 การกระจายตัวของเลขนัสเชิลท์ที่ผนังในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบาง ติดครีบริปูตัววีแบบแยกตัวที่ $Re = 1200$ และมุม $30^\circ$	42
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับ กรณีท่อใส่แผ่นบางติดครีบริปูตัววีแบบแยกตัวที่ค่า $BR$ ต่างๆ	43
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับ กรณีท่อใส่แผ่นบางติดครีบริปูตัววีแบบแยกตัวที่ค่า $BR$ ต่างๆ	43
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับ กรณีสำหรับกรณี ท่อใส่แผ่นบางติดครีบริปูตัววีแบบแยกตัวที่ค่า $BR$ ต่างๆ	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ที่ผนังท่อกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบตัววีแบบแยกตัว ที่มุมปะทะต่างๆที่ค่า $BR = 0.20$ และ $Re = 1200$ .....	45
5.6 การความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ.....	46
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ.....	47
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อ.....	48
5.9 การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ที่ผนังท่อกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบตัววีแบบแยกตัว ที่ค่า $PR$ ต่างๆ โดยที่ $\alpha = 30^\circ$ , $Re = 1200$ และ $BR = 0.20$ .....	49
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ค่า $PR$ ต่างๆ.....	50
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาที่ $PR = 1$ และ $1.5$ ตามลำดับที่ค่า $BR = 0.20$ และมุม $30^\circ$ .....	51
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน $TEF$ กับเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาที่ $PR = 1$ และ $1.5$ ตามลำดับที่ค่า $BR = 0.20$ และมุม $30^\circ$ .....	51
5.13 การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ที่ผนังท่อกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบตัววีแบบแยกตัว ที่มีการไหลแบบ V-downstream และ V-upstream โดยที่ $\alpha = 30^\circ$ , $Re = 1200$ และ $BR = 0.20$ .....	52
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่การไหลแบบต่างๆ.....	53
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาการไหลแบบ V-downstream และ การไหลแบบ V-upstream ที่ค่า $BR = 0.20$ และมุม $30^\circ$ .....	54
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน $TEF$ กับเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาการไหลแบบ V-downstream และ การไหลแบบ V-upstream ที่ค่า $BR = 0.20$ และมุม $30^\circ$ .....	55
5.17 การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ที่ผนังท่อกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบตัววีแบบแยกตัว ในท่อกลมและท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยที่ $\alpha = 30^\circ$ , $Re = 1200$ และ $BR = 0.20$ .....	56
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มีแบบท่อแบบต่างๆ.....	57
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ กรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบตัววีแบบแยกตัวในท่อกลมและท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยที่ $\alpha = 30^\circ$ และ $BR = 0.20$ .....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน TEF กับ เลขเรย์โนลด์ส์  
กรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในท่อกลมและท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

โดยที่  $\alpha = 30^\circ$  และ  $BR = 0.20$ ..... 58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$A_c$	พื้นที่หน้าตัดของท่อ, $m^2$
$A_s$	พื้นที่ผิวท่อทั้งหมด, $m^2$
BR	อัตราส่วนการบดเคี้ยวการไหล
$b$	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
$f_o$	ตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่าผิวเรียบ
$g$	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	เลขนัสเซลท์
$Nu_o$	เลขนัสเซลท์ของท่อเปล่าผิวเรียบ
$P$	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, $m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$S$	เทอมของการสร้างหรือสูญหาย
$s$	อัตราการเสียรูปร่างเชิงเส้นของชิ้นส่วนของไหล
$T$	อุณหภูมิ, $K$
$T_m$	อุณหภูมิเฉลี่ย, $K$
$T_s$	อุณหภูมิผิว, $K$
$t$	เวลา, $s$
$u$	เวกเตอร์ความเร็ว, $m/s$
$u$	ความเร็วในแนวแกน $x$ , $m/s$
$u_m$	ความเร็วเฉลี่ย, $m/s$
$v$	ความเร็วในแนวแกน $y$ , $m/s$ ; ปริมาตรจำเพาะ, $m^3/kg$
$w$	ความเร็วในแนวแกน $z$ , $m/s$
$X_{fd,h}$	ความยาวช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวของการไหล, $m$
$X_{fd,t}$	ความยาวช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวของความร้อน, $m$
$\Phi$	ฟังก์ชันการสลายตัว
$\alpha$	ค่าการฟุ้งกระจายของความร้อน, $m^2/s$ ; มุมปะทะของแผ่นกั้นกับกระแสการไหล, degree
$\phi$	ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อ หน่วยมวล
TEF	สมรรถนะเชิงความร้อน
$\lambda$	ความหนืดที่สอง
$\mu$	ความหนืดสัมบูรณ์, $N \cdot s/m^2$
$\Gamma$	การแพร่ทางความร้อน
$\rho$	ความหนาแน่น, $kg/m^3$
$\tau$	ความเค้นเฉือนเนื่องจากความหนืด, $N/m^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันจะทราบกันดีว่าความต้องการพลังงานมีมากขึ้นเนื่องจากโลกมีความเจริญก้าวหน้ารวมทั้งวงการอุตสาหกรรมได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วทำให้มีการใช้พลังงานในปริมาณที่สูงเพิ่มขึ้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์แบบหนึ่งที่สำคัญกับกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมมาก เช่น หม้อน้ำ คอนเดนเซอร์ อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่น้ำ หม้อน้ำรถยนต์ คอยล์ร้อนหรือคอยล์เย็น เป็นต้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆเหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานค่อนข้างมากและตัวอย่างของกระบวนการที่ความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็นโดยไม่มีการผสมกันทางกายภาพ มีหลายประเทศพยายามที่จะหาวิธีเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อให้มากที่สุด ดังนั้นการเพิ่มสมรรถภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการติดแผ่นครีบบเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ที่ผ่านมาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ โดยการทำให้พื้นที่ผิวขรุขระหรือติดครีบบที่ผิวภายในท่อเพื่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ปัญหาของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ ต้องการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น จากปัญหาดังกล่าว ถ้าเราสามารถหาวิธีเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้นเป็นผลให้เพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หลักการเดิมเป็นการติดครีบบที่ผิวภายในท่อเป็นวิธีการในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นแนวทางหนึ่งที่มีการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการติดแผ่นครีบบรูปตัววีแบบแยกตัว จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อการค้นคว้าวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลมที่ติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวภายในท่อเพื่อเป็นตัวเพิ่มความปั่นป่วนและลดค่าความต้านทาน โดยวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ
- 1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลท์และค่าประกอบการเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลมที่ติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัว กับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลมผิวเรียบ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของรูปร่าง มุม ตำแหน่งของแผ่นครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัว ภายในท่อชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และท่อกลมที่จัดวางแผ่นครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัว ในลักษณะต่างๆ
- 1.2.4 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume methods)
- 1.3.2 ทำการคำนวณในแบบจำลองการไหลสามมิติที่มีการไหลแบบลามินาร์ในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ จาก 100 ถึง 1200
- 1.3.3 ทำการวิจัยเฉพาะท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลมที่สภาวะอุณหภูมิผิวคงที่เท่ากับ 310 K

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 รวบรวมข้อมูล ทำการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส และท่อกลม
- 1.4.2 กำหนดลักษณะของปัญหา และกำหนดลักษณะรูปร่างของแผ่นครีบริบและสร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลพร้อมกับเลือกขนาดและจำนวนกริดที่เหมาะสม
- 1.4.3 ตรวจสอบโปรแกรมกับผลเฉลยแน่นอนตรง (Exact solution) ทำการคำนวณเชิงตัวเลขในปัญหาที่ต้องการศึกษา
- 1.4.4 ทำการคำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการไหลสามมิติที่ต้องศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามที่ระบุในวัตถุประสงค์ ได้แก่ ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ รูปแบบของแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ครีบริบ มุมปะทะ และค่าอัตราส่วนการบล็อกรูปแบบของครีบริบที่ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณ นำข้อมูลจากการคำนวณมาทำการวิเคราะห์ผลและแสดงค่าในรูปพารามิเตอร์ไร้หน่วย
- 1.4.6 สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์และข้อเสนอแนะที่ควรทำการวิจัยต่อไป

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.5.1 เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ
- 1.5.2 พัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น
- 1.5.3 สามารถนำหลักการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่างๆ

## 1.6 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

- บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมาย ขอบเขตงานวิจัยขั้นตอนดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากการงานวิจัย
- บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย และการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล
- บทที่ 4 กล่าวถึงการกำหนดปัญหาและตรวจสอบผลการคำนวณ
- บทที่ 5 กล่าวถึงผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย
- บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน มีความสำคัญต่อการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ทั้งในกระบวนการผลิตสินค้าอุปโภคและบริโภค ดังนั้นจึงมีนักวิจัยจำนวนมากทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยวิธีต่าง ๆ โดยเหตุผลเพื่อช่วยลดขนาดและต้นทุนการผลิตให้น้อยลงไปกว่าที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาในเรื่องของการปรับปรุง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

Promvong et al. [1] ทำการศึกษาวิจัยโดยอาศัยวิธีการใช้การคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบในท่อจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกันเอียงมุม  $45^\circ$  บนผนังด้านหนึ่งของท่อ จากการศึกษาพบว่าแผ่นกันวางเอียงทำให้เกิดการไหลหมุนวนแบบคู่ซึ่งกระแสน้ำที่หมุนวนนี้จะไปกระแทกส่วนที่เป็นผนังท่อทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนและค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุดเท่ากับ 2.2 ที่ค่า  $BR = 0.4$  ที่  $Re = 1200$

Metzger et al. [2] ทำการศึกษามวลของมุมครีบและตาแหน่งครีบ มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่จุดใด ๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับตำแหน่งของครีบ แบบที่ 1 ครีบถูกติดตั้งในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม และแบบที่ 2 ครีบถูกติดตั้งในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม พบว่าครีบมุม  $60^\circ$  ให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อนดีที่สุด

Han and Zhang [3] นำเสนอการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยครีบทั้งหมด 7 รูปทรงของครีบที่วางแบบเว้นช่วง พบว่าครีบรูปตัววีทามุม  $60^\circ$  แบบวางเว้นช่วงให้การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ 4.5 เท่า และดีกว่าครีบแบบวางต่อเนื่อง ในการทดลองทั้งหมดได้ติดตั้งครีบที่ผนังสองด้านและค่าความสูงครีบต่อความสูงท่อเท่ากับ 0.0625 และระยะพิทช์ต่อความสูงครีบเท่ากับ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Liou et al. [4,5] ทำการทดลองครีบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ครีบสามเหลี่ยม และครีบครึ่งวงกลม พบว่า ครีบสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อนดีที่สุดในครีบทั้งหมดที่ทดลอง ดังนั้นเพื่อการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อด้วยครีบบาง มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงจะนำเสนอทั้งการคำนวณเชิงตัวเลขและผลการทดลอง สำหรับการไหลแบบราบเรียบ 3 มิติ โดยพิจารณา ลักษณะการไหลเป็นคาบ ในท่อที่ติดครีบบางลักษณะต่าง ๆ โดยศึกษาถึงผลของอัตราส่วนการปิดกั้นของ ครีบและมุมปะทะ ที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มสมรรถนะความร้อน

Zhang et al. [6] ทำการศึกษาอิทธิพลของร่องระหว่างครีบในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มี Aspect Ratio,  $AR = 1-10$  ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์  $Re = 10,000-50,000$  และพบว่า ร่องระหว่าง ครีบให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าผนังครีบ แต่มีค่าความดันตกคร่อมเท่ากัน

Gentry and Jacobi [7] การออกแบบปีกเพื่อให้เกิดการหมุนวนของของไหล ซึ่งเป็นการ เพิ่มระดับการปั่นป่วน และการพาความร้อนดีขึ้นก่อให้เกิดการเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่ดีขึ้น ได้ นำเสนอการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยการเพิ่มการหมุนวนที่หัวมุมของแผ่นเรียบ โดยค่าเฉลี่ยของ การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น 50-60% โดยที่ผิวของแผ่นเรียบจะใช้ปีกแบบ เดลต้า ซึ่งถือว่าดีกว่าปีก แบบสามเหลี่ยมหน้าจั่ว เพราะเพิ่มอัตราส่วนการไหลและมุมปะทะ

Olsson and Sunden [8] ทำการศึกษารูปแบบการไหล, ความดันตกคร่อม และการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบ ช่วงที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์  $Re = 500-15,000$  ค่า Aspect Ratio,  $AR$  ของท่อสี่เหลี่ยม คือ 1-8, และครีบถูกติดกับผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม ทำการทดสอบครีบต่าง ๆ ดังนี้ ครีบถูกติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงข้าม, ครีบถูกติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงข้าม, ครีบบรูปตัววีถูกติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงข้าม, ครีบบรูปตัววีถูกติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงข้าม และครีบบรูปตัววีแบบต่อสลับทิศทางการไหล (แนวครีบบรูปตัววีมีทิศทางการไหลและการไหลและมีทิศทางการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงข้าม การถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมถูกแสดงโดยตัวประกอบ  $j$  (Colburn heat transfer factor) และตัวประกอบ  $f C$  (Fanning friction factor) พบว่า ครีบบรูปตัววีแบบต่อสลับทิศทางการไหลให้ค่าตัวประกอบ  $j$  และค่าตัวประกอบ  $f C$  มากกว่าครีบบรูปอื่น ๆ ของการศึกษานี้ ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ส์  $Re = 1,000-2,000$

Gao and Sunden [9] ได้ทำการวัดลักษณะการไหลในช่องขนานที่ติดครีบบรูปตัววีมีทิศทางการไหลและการไหลและครีบบรูปตัววีมีทิศทางการไหลตรงข้ามกับการไหล โดยใช้เครื่องมือ laser doppler เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

velocimetry และ smoke visualization เพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อม จากผลการทดลองพบว่า ครีบริปูตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทาน และการเพิ่มสมรรถนะความร้อนมากกว่าครีบริปูตัววี เมื่อติดตั้งทิศทางเดียวกับการไหล

Choi et al. [10] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและความร้อนที่ให้กับท่อสี่เหลี่ยมเป็นฟังก์ชันความร้อนคงที่ โดยติดครีบริปูตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหล และครีบริปูตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลที่มุม 45° จากผลการทดลองพบว่า ครีบริปูตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบเสียดทานมากกว่าครีบริปูตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหล

Chandra et al. [11] วัดค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดครีบริปูแบบต่อเนื่อง ที่ผนัง 1, 2, 3 และ 4 ด้าน ความยาวท่อทดสอบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ 20 ครีบริปูที่ใช้ติดบนผนังมีค่าอัตราส่วนความสูงครีบริปูต่อความสูงของท่อเท่ากับ 0.0625 และอัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบริปูเท่ากับ 8 เขาพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนของผนังที่ติดครีบริปู เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์ เพิ่มขึ้นสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนลดลง ขณะเดียวกันค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น

Benlu and Jiang [12] ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยมด้วยครีบริปูเอียงตามมุม 0°, 20°, 30°, 45°, 60° และ 90° กับทิศทางการไหล โดยมีขอบเขตการศึกษาในช่วงอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.0010-0.0018 kg/s ครีบริปูมีความสูง 0.8 มิลลิเมตร มีความกว้าง 1 มิลลิเมตร และมีระยะพิชต์ 4 มิลลิเมตร โดยครีบริปูต่าง ๆ

Han et al. [13] ทำการศึกษาผลของรูปทรงครีบริปู, มุมครีบริปู และอัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงมีผลต่อตัวประกอบเสียดทาน และการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีครีบริปูถูกติดบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์  $Re = 3,000-30,000$  พบว่า การจัดครีบริปูแบบสมมาตรมีผลเหมือนกับการจัดครีบริปูแนวเอียงกันและรูปร่างของครีบริปูมีผลอย่างมากต่อตัวประกอบเสียดทาน และมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนไม่มากนัก จากผลการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเมื่อครีบริปูมีมุม 45°

Han et al. [14] ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงครีบริปูตัววีมุม 45° และครีบริปูตัววีมุม 60° แบบแรก แนวครีบริปูตัววีมุม 45° และแนวครีบริปูตัววีมุม 60° มีทิศทางเดียวกับการไหล และแบบที่สอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวครีบริบรูปตัววีมุม  $45^\circ$  และแนวครีบริบรูปตัววีมุม  $60^\circ$  มีทิศทางตรงข้ามกับการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์  $Re = 15,000-90,000$  พบว่า แนวครีบริบรูปตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมมากกว่าแนวครีบริบรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหล โดยครีบริบรูปตัววีมุม  $60^\circ$  ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมมากกว่าครีบริบรูปตัววีมุม  $45^\circ$  ส่วนในด้านการเพิ่มสมรรถนะความร้อนครีบริบรูปตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลให้ค่ามากกว่าครีบริบรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหล โดยครีบริบรูปตัววีมุม  $45^\circ$  มีค่าการเพิ่มสมรรถนะความร้อนมากกว่าครีบริบรูปตัววีมุม  $60^\circ$

Han et al. [15] ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีครีบริบรูปตัววีและครีบริบรูปสามเหลี่ยม เพื่อให้เกิดการไหลปั่นป่วน พบว่า ครีบริบรูปสามเหลี่ยมให้การเพิ่มสมรรถนะความร้อนดีที่สุด

Taslim et al. [16] รายงานค่าเลขนัสเซลท์ที่จุดใด ๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบเนื่องจากมุมครีบริบ รูปทรงครีบริบตัววี และความไม่ต่อเนื่องครีบริบ (แนวครีบริบรูปตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อ ด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่น ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ความร้อนพบว่าค่าเลขนัสเซลท์มากที่สุดเมื่อแนวครีบริบรูปตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหล

Rau et al. [17] นำเสนอการกระจายการถ่ายเทความร้อนที่จุดใด ๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดครีบริบบนผนังหนึ่งด้าน โดยเปลี่ยนค่าอัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบริบ และใช้เทคนิค Liquid crystal thermography ในการหาค่าสนามอุณหภูมิที่จุดใด ๆ ซึ่งค่าอัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูง ครีบริบที่ใช้ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 6, 8, 9, 10, 12, 14 และ 16 ส่วนค่าอัตราส่วนความสูงครีบริบต่อความสูง ของท่อใช้ที่ค่าเดียวซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 พบว่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดที่ค่าอัตราส่วนระยะพิชต์ต่อ ความสูงครีบริบเท่ากับ 9 และ 12

Ahn [18] ทำการศึกษาผลกระทบของครีบริบบนผนังต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยม โดยหาการศึกษารูปทรงครีบริบ 5 ชนิด ได้แก่ ครีบริบสี่เหลี่ยม ครีบริบสามเหลี่ยม ครีบริบวงกลม ครีบริบครึ่งวงกลมทรงต่ำ และครีบริบครึ่งวงกลมทรงสูง โดยทำการศึกษาที่ความสูงครีบริบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $e/D_h$ ) เท่ากับ 0.0476 อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบริบ ( $P/e$ ) เท่ากับ 8 และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ 2.33 และรูปแบบครีบริบ จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สี่เหลี่ยม ส่วนครึ่งวงกลมและครึ่งวงกลมมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน โดยที่ช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 10,000$  แผ่นครึ่งสามเหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นเรียบ 3 เท่า ในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 20,000$  จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ส มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมพบว่าแผ่นครึ่งสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมมากที่สุดตามด้วยแผ่นครึ่งสี่เหลี่ยม

Murata and Mochizuki [19] ศึกษาเชิงตัวเลขการกระจายการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดครีบ โดยใช้วิธีการจำลอง large eddy โดยครีบบางทามุม  $60^\circ$  ที่ค่าอัตราส่วนความสูงครีบต่อความสูงของท่อเท่ากับ 0.1 และอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงครีบเท่ากับ 10 จากการคำนวณเชิงตัวเลขชี้ให้เห็นว่าการไหลมีจุดกระทบที่ผนังจะอยู่กึ่งกลางระหว่างครีบซึ่งส่งผลให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่จุดใดๆ

Karwa [20] ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในท่อสี่เหลี่ยมที่มีติดตั้งครีบบ้านเดียว โดยครีบที่ทดสอบมีลักษณะเป็นครีบตรง ครีบเอียง ครีบรูปตัววี ทั้งในลักษณะยาวต่อเนื่อง และแบบแยกส่วน โดยอุปกรณ์ที่ทดสอบมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงท่อสี่เหลี่ยมเท่ากับ 7.19 ถึง 7.75 อัตราส่วนความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $e/D_h$ ) เท่ากับ 0.0476 และ 0.050 และอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงครีบ ( $P/e$ ) เท่ากับ 10 โดยครีบรูปตัววีที่ทดสอบเป็นครีบรูปตัววีทามุม  $60^\circ$  และครีบทแยงมุม โดยทำการทดลองในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ส  $Re=2,800-15,000$  และความร้อนที่ให้กับท่อสี่เหลี่ยมเป็นฟังก์ชันความร้อนคงที่ รูปแบบครีบภายในท่อสี่เหลี่ยม

Tanda [21] ทำการศึกษาค่าการเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบบยาวต่อเนื่องและครีบบยาวไม่ต่อเนื่อง ทดลองในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 8,900-28,500$  อัตราส่วนความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $e/D_h$ ) เท่ากับ 0.09 และ 0.15 อัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงครีบ ( $P/e$ ) เท่ากับ 8 และ 13.3 และอัตราส่วนความสูงครีบต่อความสูงแผ่นช่องขนานเท่ากับ 0.15 และ 0.25 รูปแบบครีบภายในท่อสี่เหลี่ยม

Promvongse and Thianpong [22] นอกเหนือจากบทความนี้ ในการศึกษาส่วนใหญ่จะให้ความสนใจช่องขนานแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรืออัตราส่วนของรูปทรงของช่องขนานต่ำ ๆ โดยรูปร่างของครีบเป็นแบบ ครึ่งวงกลม วงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือแฮมเฟอร์ และมุมของครีบเป็น  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  สำหรับอัตราส่วน  $e/H$  ระหว่าง 0.05 และ 0.15 และอัตราส่วน  $P/e$  อยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 20 การหาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเหมาะสมรูปร่างของครีบของความแตกต่างหน้าตัดสามเหลี่ยมพบไม่บ่อยในรายงาน ด้วยเหตุนี้ จุดมุ่งหมายสำคัญของการนำเสนอผลงานเพื่อเพิ่มเติมของข้อมูลการทดลองครีบริบรูปสามเหลี่ยมต่างๆ (สามเหลี่ยมหน้าจั่วและสามเหลี่ยมมุมฉาก) โดยในทำนองเดียวกัน อัตราส่วน  $e/H$  เพิ่มขึ้นเป็น 0.3 ผลลัพธ์เหล่านี้ช่วยการออกแบบที่ดีขึ้นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการทดสอบจะใช้อากาศในการทดสอบ โดยการไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์อยู่ในตั้งแต่ 5,000 ถึง 16,000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

### และการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล

#### การถ่ายเทความร้อนและการไหลในท่อ

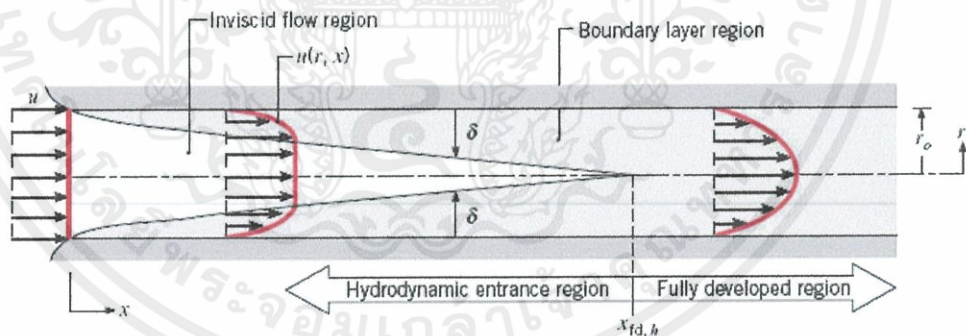
##### 3.1 บทนำ

การไหลภายในท่อมืดมีข้อจำกัด คือความหนาของบาวนด์คาร์เลเยอร์ ไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆได้ เพราะว่าเมื่อของไหลไหลไปได้ระยะหนึ่งบาวนด์คาร์เลเยอร์ก็จะก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อ รูปร่างของความเร็วจึงมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ช่วงที่ความหนาของบาวนด์คาร์เลเยอร์มีการเพิ่มขึ้นจะเรียกว่า การไหลที่กำลังปรับตัว (Developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region และเมื่อความหนาของบาวนด์คาร์เลเยอร์ก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อจะเรียกว่า การไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed flow)

##### 3.2 การไหลของของไหล

###### 3.2.1 สภาวะการไหล

พิจารณการไหลแบบลามินาร์ ในท่อกลมที่มีรัศมี  $r_0$  ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การก่อตัวของบาวนด์คาร์เลเยอร์ของการไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม

สำหรับการไหลภายในท่อนั้น ต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (Entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นอย่างไร แบบลามินาร์ หรือเทอร์บูเลนซ์ เลขเรย์โนลด์ส์สำหรับการไหลภายในท่อกลมกำหนดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Re}_D \equiv \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (3.1)$$

ซึ่ง  $u_m$  เป็นความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ

$D_h$  เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) ของท่อ

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

$$\left( \frac{x_{fd,h}}{D_h} \right)_{\text{lam}} \approx 0.05 \text{Re}_D \quad (3.2)$$

### 3.2.2 ความเร็วเฉลี่ย (Mean velocity)

ข้อแตกต่างของการไหลภายในและการไหลภายนอกก็คือ เราไม่สามารถใช้ความเร็วของกระแสอิสระ  $u_\infty$  ของของไหลได้ เนื่องจากความเร็วภายในท่อจะแปรเปลี่ยนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังนั้นจึงใช้ความเร็วเฉลี่ย  $u_m$  (Mean velocity) แทน โดยนิยามว่าความเร็วเฉลี่ยนี้คือ ความเร็วที่เมื่อคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อและความหนาแน่นของของไหลแล้วจะเท่ากับอัตราการไหลของมวล ซึ่งได้

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \quad (3.3)$$

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

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

$$\text{Re}_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเราใช้งานเพื่อการศึกษานานับ ไม่นอนเราเข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เพราะค่า  $\dot{m}$  อาจหาได้จากการอินทิเกรตของฟลักซ์มวล ( $\rho u$ ) ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c \quad (3.5)$$

ดังนั้นสำหรับท่อกลม กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ แล้วจะได้

$$u_m = \frac{\int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c}{\rho A_c} = \frac{2\pi\rho}{\rho\pi r_o^2} \int_0^{r_o} u(r, x) r dr = \frac{2}{r_o^2} \int_0^{r_o} u(r, x) r dr \quad (3.6)$$

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

### 3.2.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

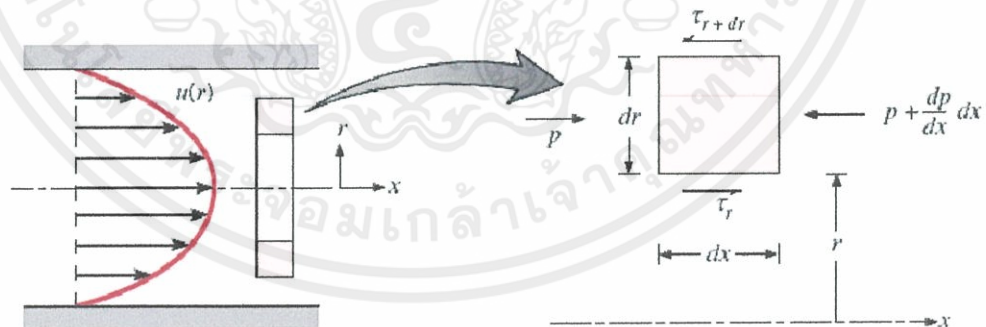
รูปทรงของความเร็วสามารถหาได้ สำหรับการไหลแบบลามินาร์ของของไหลที่คุณสมบัติคงที่ อัดตัวไม่ได้ ในช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้วของท่อกลม (สำหรับเทอร์บูเลนซ์ ส่วนใหญ่ต้องอาศัยผลจากการทดลองเป็นหลัก) โดยทั่วไปจะเป็นฟังก์ชันของรัศมี

สิ่งสำคัญสำหรับเงื่อนไขข้างต้นก็คือค่าความเร็วในแนวรัศมีและการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกนทุกๆ แห่งมีค่าเป็นศูนย์

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

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

ความเร็วตามแนวแกนหาได้ จากการแก้สมการที่เหมาะสมของสมการโมเมนตัม ตามแนว  $x$  หรืออาจจะหาโดยคิดสมดุลของการอนุรักษ์โมเมนตัมก็ได้ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สมดุลแรงบนอิลิเมนต์  $dx$  สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ก่อตัวเต็มที่ในท่อกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปใช้ในส่วนการดำเนินงานใดๆ ได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ซึ่งลดรูปเป็น 
$$-\frac{d}{dr}(r\tau_r) = r \frac{dp}{dx} \quad (3.7)$$

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

ดังนั้น (3.7) จะเป็น 
$$\frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} \quad (3.8)$$

เพราะว่า  $\frac{dp}{dx}$  นั้นไม่ขึ้นกับ  $r$  ดังนั้น เราสามารถอินทิเกรต (3.8) 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  $\partial u / \partial r|_{r=0} = 0$  จะได้

$$u(r) = -\frac{1}{4\mu} \left( \frac{dp}{dx} \right) r_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (3.9)$$

ดังนั้น รูปทรงของความเร็วสำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะเป็น “พาราโบลาและจะ

สังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน  $\left( \frac{dp}{dx} \right)$  ต้องเป็นลบเสมอ

ผลลัพธ์ที่กล่าวมานี้อาจใช้หาความเร็วเฉลี่ยได้ ( $u_m$ ) โดยแทนสมการ (3.9) ใน (3.6) แล้วทำการอินทิเกรตจะได้

$$u_m = -\frac{r_0^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} \quad (3.10)$$

แทนสมการ (3.10) ใน (3.9) จะได้รูปร่างของความเร็วเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{u(r)}{u_m} = 2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_o} \right)^2 \right] \quad (3.11)$$

เพราะว่า  $u_m$  สามารถหาได้จากการรู้อัตราการไหลของมวล ดังนั้นสมการ (3.10) สามารถหาเกรเดียนของความเร็วได้ ( $\frac{dp}{dx}$ )

### 3.2.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว

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

$$f \equiv \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2 / 2} \quad (3.12)$$

ค่านี้ต่างกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน  $C_f$  ซึ่งบางครั้งเรียกว่า “ตัวประกอบเสียดทานเฟอโนนิง” ซึ่งนิยามว่า

$$C_f \equiv \frac{\tau_s}{\rho u_m^2 / 2} \quad (3.13)$$

เพราะว่าแรงเฉือนบนผิวของของไหลเท่ากับ (ทิศทางตรงกันข้าม) แรงบนผิวของของไหล ดังนั้นความเค้นเฉือนบนผิวกำหนดเป็น  $\tau_s = -\mu(du/dr)_{r=r_o}$  จากสมการ (3.9) ได้

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (3.14)$$

แทนสมการ (3.1) และ (3.10) ลงใน (3.12) สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ได้

$$f = \frac{64}{\text{Re}_D} \quad (3.15)$$

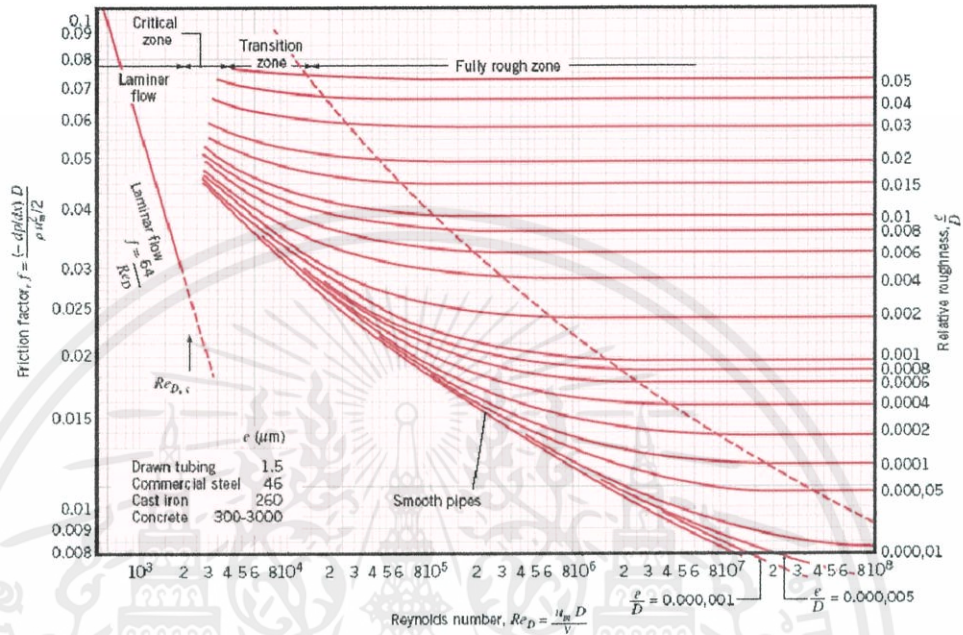
$$\text{สำหรับท่อกลม } (f = \frac{57}{\text{Re}_D})$$

นอกจากนี้ เรารู้ว่า ความดันตกคร่อม ( $\Delta p$ ) ระหว่างระยะ  $x_1$  ถึง  $x_2$  เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

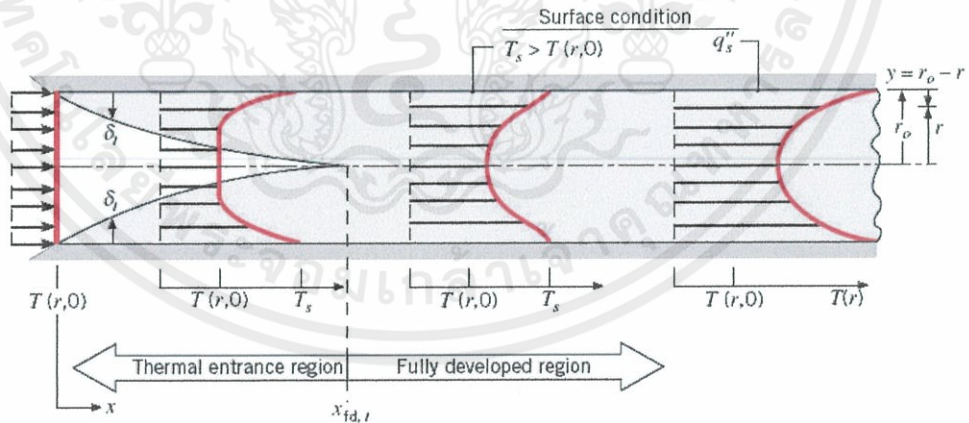
$$\Delta p = - \int_{p_1}^{p_2} dp = f \frac{\rho u_m^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx = f \frac{\rho u_m^2}{2D} (x_2 - x_1) \tag{3.16}$$

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ซึ่งค่า  $f$  หาได้จากรูปที่ 3.3 หรือจากสมการ (3.15)



รูปที่ 3.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม

### 3.3 การถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 3.4 การก่อตัวของบาวนด์รีเลเยอร์ทางความร้อนในท่อกลม

เรามาพิจารณาอิทธิพลของความร้อนข้างล่างของไหลเข้าไปในท่อตามรูปที่ 3.4 ที่อุณหภูมิ

สม่ำเสมอ  $T(r,0)$  ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและบาวนด์รีเลเยอร์ของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

อมคกที่ ( $T_s =$  คงที่) หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ ( $q_s'' =$  คงที่) สภาวะที่ปรับตัวคงที่แล้วของความร้อน (thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น ในที่สุดรูปร่างของอุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะแตกต่างกันตามเงื่อนไข ไม่ว่าจะกรณีอุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัว จะเป็น

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05 \text{ Re}_D \text{ Pr} \quad (3.17)$$

โดยการเปรียบเทียบบริเวณทางเข้า(Entrance region) ของอุณหภูมิตามสมการ (3.17) กับสมการของความเร็ว (3.2) จะพบว่าต่างกันที่ค่า Pr เท่านั้น จึงพอสรุปได้ว่า ถ้า  $\text{Pr} > 1$  แล้ว ไฮโดรไดนามิคบาวนด์คาร์เลเยอร์ ขยายเร็วกว่า บาวนด์คาร์เลเยอร์ของความร้อนมาก ( $x_{fd} > x_{fd,t}$ ) และจะกลับกันถ้า  $\text{Pr} < 1$  สำหรับค่า Pr สูงๆเช่น น้ำมัน ( $\text{Pr} \geq 100$ )  $x_{fd}$  จะน้อยกว่า  $x_{fd,t}$  มากมายและอาจสมมุติได้ว่ารูปทรงของความเร็วยังคงมีค่าที่ปรับตัวเต็มที่แล้วมีตลอดช่วงบริเวณทางเข้าของความร้อน ในทางกลับกันของไหลที่มีค่า Pr ต่ำมากๆเช่น โลหะเหลว ( $\text{Pr} \leq 0.05$ ) รูปร่างอุณหภูมิมักจะเป็นแบบอัดตัวเต็มที่แล้วได้เร็วมาก ในขณะที่รูปร่างของความเร็วยังอยู่ในช่วงกำลังก่อตัวอยู่ ส่วนในการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์เงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ Pr และโดยการประมาณคร่าวๆก่อนได้ว่า  $x_{fd,t}/D = 10$

### 3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย

ในเรื่องอุณหภูมินี้ จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ย ( $T_m$ ) ในลักษณะที่เหมือนกัน  $u_m$  โดยให้ความหมาย

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho u c_v T dA_c}{m c_v} \quad (3.18)$$

สำหรับท่อกลม และเป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ จะได้ว่า

$$T_m = \frac{2}{u_m r_o^2} \int_0^{r_o} u T r dr \quad (3.19)$$

ค่าของ  $T_m$  จะเปลี่ยนตามแนว  $x$  ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหล ซึ่งต่างจาก  $u_m$  ที่มีค่าคงที่สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ฟลักซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.20)$$

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

### 3.3.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed conditions)

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหลคืออุณหภูมิของไหลต้องยังคงเปลี่ยนแปลงตามระยะ  $x$  สิ่งที่ยากรู้คือเกิดภาวะ 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 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิเพื่อให้ได้เงื่อนไข

จากสำหรับการนำแบบทรานเซียนท์และสมการอนุรักษ์พลังงาน ได้ความแตกต่างอุณหภูมิไร้มิติในรูป  $(T_s - T)/(T_s - T_m)$  ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอยู่จริงซึ่งอัตราส่วนนี้จะจะเป็นอิสระกับ  $x$  นั่นคือถึงแม้ว่า  $T(r)$  ยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ  $x$  แต่รูปร่างสัมพัทธ์ของ Profile นี้จะไม่เปลี่ยนแปลงเลย และการไหลแบบนี้เรียกว่า “การไหลปรับตัวเต็มที่แล้วทางความร้อน” (thermally fully developed) และจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right]_{fd,1} = 0 \quad (3.21)$$

โดยที่  $T_s$  เป็นอุณหภูมิผิวต่อ  $T$  เป็นอุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

$T_m$  เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (3.21) ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่ออาจจะเป็นกรณี  $q_s''$  คงที่หรือ  $T_s$  คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อที่ซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ  $q_s''$  คงที่ ส่วนกรณี  $T_s$  คงที่ จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสภาวะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบที่สำคัญจำนวนมากของการไหลที่ปรับตัวแล้วทางความร้อน (Thermally developed flow) มักอ้างถึงสมการ (3.21) เพราะว่าอัตราส่วนอุณหภูมินี้เป็นอิสระกับ  $x$  ค่าอนุพันธ์ของอัตราส่วนนี้เทียบกับ  $r$  ต้องไม่ขึ้นกับ  $x$  การหาค่าอนุพันธ์ที่ผิวท่อ (สังเกตว่า  $T_s$  และ  $T_m$  คงที่) เราจะได้

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

แทน  $\partial T / \partial r$  จากกฎของฟูเรียร์ ซึ่ง จากรูป 3.3 อยู่ในรูป

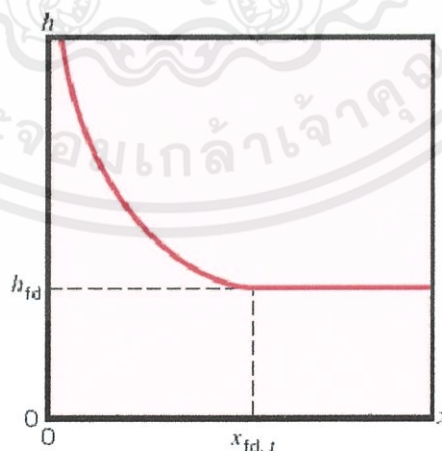
$$q_s'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_o}$$

และสำหรับ  $q_s''$  จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน จะได้

$$\frac{h}{k} \neq f(x) \quad (3.22)$$

ดังนั้นการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิของของไหล โดยมีคุณสมบัติต่างๆคงที่ ค่า  $h$  ที่ตำแหน่งใดๆจะคงที่ไม่ขึ้นกับระยะ  $x$

สมการ(3.21) ใช้ไม่ได้กับช่วงระยะทางเข้า (entrance region) ที่ซึ่ง  $h$  แปรตาม  $x$  ตามที่แสดงในรูปที่ 3.5 เพราะว่า  $\delta_t = 0$  ที่ทางเข้าของท่อดังนั้น  $h$  จะมีค่าสูงมากที่  $x = 0$  อย่างไรก็ตามค่า  $h$  จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดบาวนด์รีเลเยอร์ของอุณหภูมิจนกระทั่งเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งก็คือเข้าสู่ช่วงปรับตัวเต็มที่แล้วนั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น การเปลี่ยนแปลงตามแกน  $h$  สำหรับการไหลภายในท่อ ระเบียบข้อดำเนินการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีพิเศษ สำหรับฟลักซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) คงที่ เพราะว่าทั้งค่า  $h$  และ  $q_s''$  คงที่ ในช่วงปรับตัวเต็มที่แล้ว จากสมการ (3.20) ได้ว่า

$$\frac{dT_s}{dx}\Big|_{fd,t} = \frac{dT_m}{dx}\Big|_{fd,t} \quad q_s'' = \text{constant} \quad (3.23)$$

ถ้ากระจาย (3.21) และหาคำตอบสำหรับ  $\partial T / \partial x$  จะได้

$$\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{fd,t} = \frac{dT_s}{dx}\Big|_{fd,t} - \frac{(T_s - T)dT_s}{(T_s - T_m)dx}\Big|_{fd,t} + \frac{(T_s - T)dT_m}{(T_s - T_m)dx}\Big|_{fd,t} \quad (3.24)$$

แทนค่าจากสมการ (3.23) ได้

$$\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{fd,t} = \frac{dT_m}{dx}\Big|_{fd,t} \quad q_s'' = \text{constant} \quad (3.25)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวแกนจะเป็นอิสระกับตำแหน่งในแนวรัศมี สำหรับกรณีของ  $T_s$  คงที่ ( $dT_s / dx = 0$ ) จากสมการ (3.24) ได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{fd,t} = \frac{(T_s - T)dT_m}{(T_s - T_m)dx}\Big|_{fd,t} \quad T_s = \text{constant} \quad (3.26)$$

โดยที่ค่า  $\partial T / \partial x$  จะขึ้นอยู่กับแนวรัศมี

จากที่กล่าวมาพอเชื่อถือได้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยเป็นตัวแปรที่สำคัญมากสำหรับการไหลภายในท่อ เพื่อที่จะอธิบายการไหลนั้นๆ จำเป็นต้องรู้การแปรเปลี่ยนของมันกับค่า  $x$  ซึ่งการแปรเปลี่ยนหาได้โดยการประยุกต์การสมดุลพลังงานทั้งหมดกับการไหล

### 3.4 การสมดุลของพลังงาน (Energy Balance)

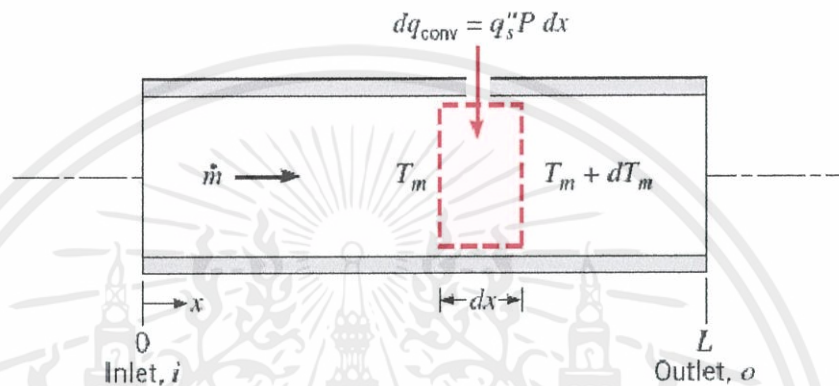
พิจารณาการไหลในท่อตามรูปที่ 3.6 ของไหลไหลด้วยอัตรามวลคงที่  $\dot{m}$  และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของของไหลรวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางแนวแกนจะไม่นำมาคิด ดังนั้นถ้าไม่มีงานเพลาสิ่งกระทำโดยของไหลขณะไหลผ่านท่อแล้ว จะมีเพียงอิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน และกับงานจากการไหลเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 3.6 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 3.6 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ

หรือ 
$$dq_{conv} = \dot{m} d(c_v T_m + pv) \quad (3.27)$$

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

$$dq_{conv} = \dot{m} dc_p T_m \quad (3.28)$$

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

รูปพิเศษของสมการ (3.28) เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขสำหรับท่อทั้งหมด โดยการอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อ จะได้

$$dq_{conv} = \dot{m} c_p (T_{m,o} + T_{m,i}) \quad (3.29)$$

โดยที่  $q_{conv}$  เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (3.28) อาจเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่สะดวกได้โดยใช้สมการอัตราการพาความร้อนต่อปริมาตร ควบคุมคือ  $dq_{conv} = q_s'' P dx$  ซึ่ง  $P$  เป็นเส้นรอบรูป ( $P = \pi D$ ) สำหรับท่อกลม โดยการแทนค่าจากสมการ (3.20) ได้ว่า

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} = \frac{P}{\dot{m} c_p} h(T_s - T_m) \quad (3.30)$$

คำตอบของ (3.30) สำหรับค่า  $T_m(x)$  ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความร้อนที่ผิว คืออาจจะเป็นกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ หรืออุณหภูมิที่ผิวคงที่ก็ได้

### 3.4.1 กรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constance Surface Heat Flux)

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

$$dq_{conv} = q_s'' (PL) \quad (3.31)$$

สมการนี้อาจจะใช้กับสมการ (3.29) เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ( $T_{m,o} + T_{m,i}$ )

สำหรับ  $q_s''$  คงที่ จากสมการ (3.30) จะได้

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} = f(x) \quad (3.32)$$

อินทิเกรตจาก  $x = 0$  ถึง  $x$  ใดๆได้

$$T_m(x) = T_{m,i} + \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} x \quad q_s'' = \text{Constant} \quad (3.33)$$

จาก (3.33) ได้ว่า  $T_m$  แปรเปลี่ยนเชิงเส้นกับระยะ  $x$  ตามท่อ

### 3.4.2 กรณีอุณหภูมิที่ผิวคงที่ (Constant Surface Temperature)

ผลลัพธ์สำหรับค่า  $q_{conv}$  และการกระจายของ  $T_m$  แตกต่างกันโดยสิ้นเชิงจากกรณีก่อนสำหรับกรณีนี้โดยนิยาม โดย  $\Delta T$  เป็น  $T_s - T_m$  สมการ (3.30) เขียนใหม่เป็น

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

แยกตัวแปรและอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

จากนิยามของ  $\bar{h}$  จะได้

$$\ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = -\frac{PL}{\dot{m}c_p} \bar{h}_L \quad (T_s = \text{constant}) \quad (3.34a)$$

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

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i} = \frac{T_s - T_{m,o}}{T_s - T_{m,i}} = \exp\left(-\frac{PL}{\dot{m}c_p} \bar{h}_L\right) \quad (T_s = \text{constant}) \quad (3.34b)$$

ถ้าเราอินทิเกรตจากทางเข้าถึงตำแหน่ง  $x$  ใด จะได้

$$\frac{T_s - T_m(x)}{T_s - T_{m,i}} = \exp\left(-\frac{Px}{\dot{m}c_p} \bar{h}\right) \quad (3.35)$$

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

การหาสมการสำหรับ  $q_{conv}$  ทั้งหมดนั้นยุ่งยากมาก กับธรรมชาติของเอกซ์โพเนนเชียล โดยใช้สมการ(3.29)

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

และแทนค่า  $\dot{m}c_p$  จากสมการ (3.34a) จะได้

$$q_{conv} = \bar{h}A_s \Delta T_{l,m} \quad (T_s = \text{constant}) \quad (3.36)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta T_{l,m} \equiv \frac{\Delta \bar{T}_o - \Delta \bar{T}_i}{\ln(\Delta T_o / \Delta T_i)} \quad (3.37)$$

สมการ (3.36) เป็นรูปหนึ่งของกฎการเย็นตัวของนิวตันสำหรับท่อทั้งหมดและ  $\Delta T_{l,m}$  เป็นค่าเฉลี่ยของความแตกต่างอุณหภูมิที่เหมาะสมทั่วทั้งความยาวท่อ ธรรมชาติลอการิทึมของความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยนี้เนื่องจากธรรมชาติของการลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล [แตกต่างจากความแตกต่างเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean Temperature Difference, AMTD) ซึ่งมีรูป  $\Delta T_{am} = (\Delta T_i + \Delta T_o) / 2$

### 3.5 สหพันธ์การพาความร้อนสำหรับท่อที่ไม่กลม

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

$$D_h \equiv \frac{4A_c}{P} \quad (3.38)$$




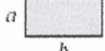
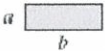
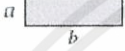

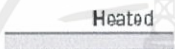
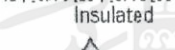

ที่ซึ่ง  $A_c$  และ  $P$  เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของการไหลตามลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลางนี้จะใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น  $Re_D$  และ  $Nu_D$

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ สหพันธ์ที่ใช้ในท่อกลมเมื่อนำมาใช้กรณีนี้อาจให้ความแม่นยำน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพื้นที่หน้าตัดที่มีมุมคมหลายมุม สำหรับกรณีเช่นนั้น ค่า  $Nu_D$  สอดคล้องกับเงื่อนไขปรับตัวเต็มที่แล้วหาได้จากตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่า  $Nu_D$  และ  $f$  สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อพื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k}$$

Cross Section	$\frac{b}{a}$	$Nu_D$		$f Re_{D_h}$
		(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
	$\infty$	8.23	7.54	96
	$\infty$	5.39	4.86	96
	—	3.11	2.49	53

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

### 3.6 สมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Performance)

สมรรถนะเชิงความร้อนหาได้จาก

$$TEF = \frac{(Nu / Nu_o)}{(f / f_o)^{1/3}} \quad (3.39)$$

เมื่อ  $TEF$  คือ สมรรถนะเชิงความร้อน

$Nu$  คือ เลขนัสเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดแผ่นกัน

$Nu_o$  คือ เลขนัสเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ

$f$  คือ ตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดแผ่นกัน

$f_o$  คือ ตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การจำลองการถ่ายเทความร้อนและสภาวะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นกั้นแบบต่างๆ นอกจากความเข้าใจทางทฤษฎีพื้นฐาน ยังต้องมีความเข้าใจทางด้านการคำนวณเชิงตัวเลขเนื่องจากเป็นเครื่องมือหลักสำหรับการหาผลเฉลย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ หัวข้อ 3.8 กล่าวถึงประวัติ และพัฒนาการโดยย่อของวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข หัวข้อ 3.9 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นแนวทางสากลที่ใช้โดยทั่วไป หัวข้อ 3.10 อธิบายคุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ความผิดพลาดของสมการดิฟเฟอเรนเชียล หัวข้อที่ 3.11 กล่าวถึงรูปแบบการจัดวางกริด และสอดคล้องกับความหมายของตัวแปร และสัญลักษณ์ที่ใช้ในบทนี้

### 3.8 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

วิวัฒนาการของการคำนวณเชิงตัวเลขเริ่มมาก่อนปี 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

### 3.9 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

หากพิจารณาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในมุมมองการโปรแกรม จะกล่าวได้ว่าเป็นโครงสร้างของอัลกอริทึมที่สามารถนำไปสู่การจำลองสภาวะการไหลได้ โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในเชิงพาณิชย์ ส่วนมากมีระบบที่ให้ผู้ใช้งานป้อนค่าต่างๆที่ต้องการแล้วจึงนำไปคำนวณ โดยแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

#### 3.9.1 ขั้นตอนประมวลผล

ขั้นตอนประมวลผล (Pre-processing) คือขั้นตอนเตรียมการ โดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหา และพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1. กำหนดรูปทรง และระบุขนาดของระบบที่สนใจ เรียกว่า การกำหนดสนามการคำนวณ (Computation domain)

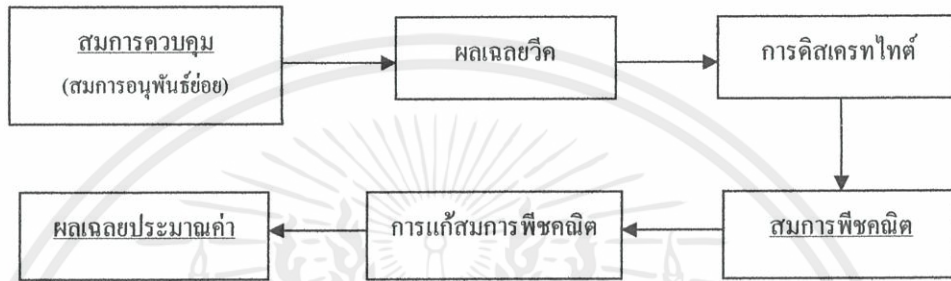
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำหนดจำนวน และรูปแบบการจัดวางกริด (Grid or Mesh) ซึ่งคือการแบ่งสนามการคำนวณ ออกเป็นปริมาตรเล็กๆ รูปแบบการจัดแบ่ง และจัดวางกริด ขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณาการจัดที่เหมาะสม ทำให้การหาผลเฉลยประมาณค่า (Approximation solution) แม่นยำขึ้น

3. เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมกับธรรมชาติของปัญหา เลือกโดยใช้องค์ความรู้ทางทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

4. กำหนดคุณสมบัติของไหล เช่นพิจารณาของไหลเป็นอากาศที่อุณหภูมิปกติ เป็นต้น

5. กำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) และค่าเริ่มต้น (Initial condition)



รูปที่ 3.7 ความเชื่อมโยงของกระบวนการ discretize ไรต์และผลเฉลยประมาณค่า

### 3.9.2 ชั้นประมวลผล

ชั้นประมวลผล (Solving) เป็นชั้นที่ต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งการคำนวณในงานวิจัยนี้ทั้งหมดใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยมีส่วนตอนดังนี้ (จากรูปที่ 3.7)

3.9.2.1 ประมวลตัวแปรไม่ทราบค่าโดยหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน (มักใช้ในปัญหาแบบปั่นป่วน) สร้างเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย โดยรวมกับสมการควบคุมการไหล

3.9.2.2 หาผลเฉลยวีค (Weak solution) ของสมการควบคุมด้วยวิธีน้ำหนักตกค้าง (Weight residual) จากนั้น discretize ไรต์ โดยประมาณแต่ละเทอมความสัมพันธ์ด้วยแบบแผนวิธีที่เลือกไว้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นสมการพีชคณิต

3.9.2.3 แก้สมการพีชคณิต ผลเฉลยที่ได้เรียกว่า ผลเฉลยประมาณค่า

### 3.9.3 ชั้นแสดงผล

ชั้นแสดงผล (Post-processing) คือการแสดงผลเฉลยประมาณค่าของตัวแปรที่สนใจ และใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ เช่น รูปแบบความเร็ว รูปแบบวอร์เทกซิตี เป็นต้น

## 3.10 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติ ควรตระหนักว่าธรรมชาติมักมีพฤติกรรมซับซ้อน ดังนั้นสิ่งที่พึงระวังอย่างยิ่งคือ ความถูกต้องของผลเฉลย ผลการคำนวณที่ดีเลิศเป็นเพียงค่าประมาณที่ดีที่สุดเท่าที่มนุษย์สามารถหาคำตอบได้เท่านั้น ไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรง

คุณสมบัติของวิธีการคำนวณ คือปัจจัยบ่งบอกความเที่ยงตรงของผลเฉลยประมาณค่า เมื่อเทียบกับพฤติกรรมจริงที่ควรเกิดขึ้น แบ่งได้หลายประการดังนี้

### 3.10.1 ความเข้ากันได้

ความเข้ากันได้ (Consistency) หมายถึงความเหมือน (Equivalent) ระหว่างสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย) และสมการพีชคณิตที่ผ่านกระบวนการดิสcretize ทั่ว เมื่อระยะกริด (Grid spacing) และ หรือค่าขั้นเวลา (Time step) ลดลงใกล้ศูนย์ โดยปกติเรียกความแตกต่างหลังจากกระบวนการดิสcretize ทั่วว่า ความผิดพลาดแบบทรานเคชัน (Truncation error) ซึ่งลดลงเมื่อมีความเข้ากันได้มากขึ้น

### 3.10.2 เสถียรภาพการคำนวณ

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

### 3.10.3 การลู่เข้าของผลเฉลย

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

### 3.10.4 การอนุรักษ์

คุณสมบัติการอนุรักษ์ (Conservation) เป็นคุณสมบัติที่มีอยู่ในกฎการอนุรักษ์ เนื่องจากผลการคำนวณมีที่มาจากสมการควบคุม ดังนั้นวิธีการคำนวณจึงควรมีคุณสมบัตินี้ด้วย โดยคุณสมบัติการอนุรักษ์เป็นจุดเด่นที่สำคัญของระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง กล่าวคือคำนึงถึงความสมดุลของการส่งถ่ายปริมาตรข้ามขอบเขตที่พิจารณา เช่นรอบผิวปิดของปริมาตรเล็กๆที่แบ่งตามระยะกริดเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.10.5 ความจำกัดขอบ

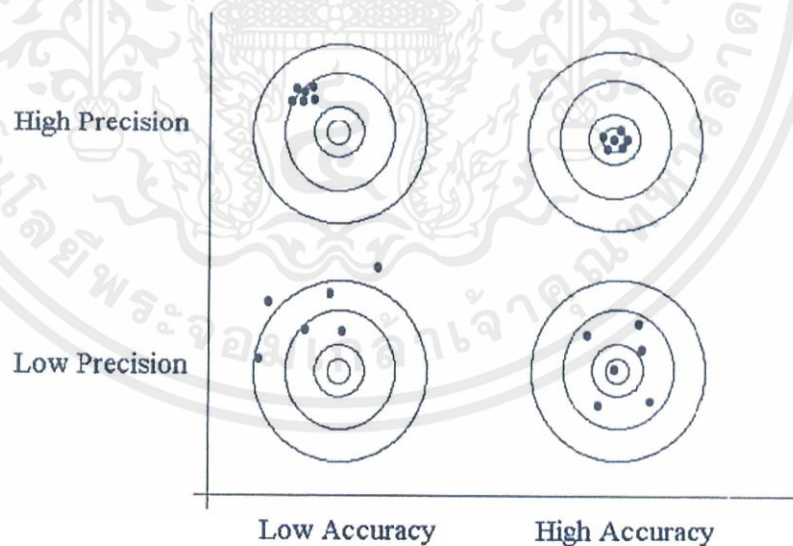
ความจำกัดขอบ (Bounded ness) หมายถึงผลเฉลยควรมีค่าอยู่ในขอบเขตจำกัด เช่นความหนาแน่น ความเข้มข้น ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ หรือระบบการถ่ายเทความร้อนที่ทราบอุณหภูมิต่ำสุด-สูงสุด ผลเฉลยที่ควรได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วงนั้นด้วยเช่นกัน โดยวิธีการคำนวณที่มีอันดับสูง (Higher order) มีแนวโน้มความจำกัดขอบต่ำลง ดังนั้นจึงไม่ควรเลือกใช้วิธีการคำนวณที่มีอันดับสูงมากเกินไปจนความจำ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

### 3.10.6 ความเสมือนจริง

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

### 3.10.7 ความแน่นอน

บ่อยครั้งในงานทางวิศวกรรมกล่าวถึงความแน่นอน (Accuracy) ซึ่งมักใช้สับสนกับความแม่นยำ (Precision) พิจารณารูปที่ 3.8 แสดงความแตกต่างระหว่างแนวคิดทั้งสองอย่างชัดเจน ตรงกลางเป้าเป็นเสมือนค่าแม่นยำ โดยเห็นได้ว่าความแน่นอนสูง หมายถึงค่าโดยเฉลี่ยไม่ต่างจากค่าแม่นยำ และความแม่นยำสูง หมายถึงค่าส่วนใหญ่กระจายตัวน้อย ดังนั้นงานวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมจึงควรให้ความสำคัญของความแน่นอน มากกว่าความแม่นยำ ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง มีแนวโน้มเดียวกับสภาพความจริงมากขึ้น แต่ในงานออกแบบต้องการความผิดพลาดลดน้อยที่สุด จึงควรใช้ทั้ง 2 แนวคิดประกอบรวมกัน



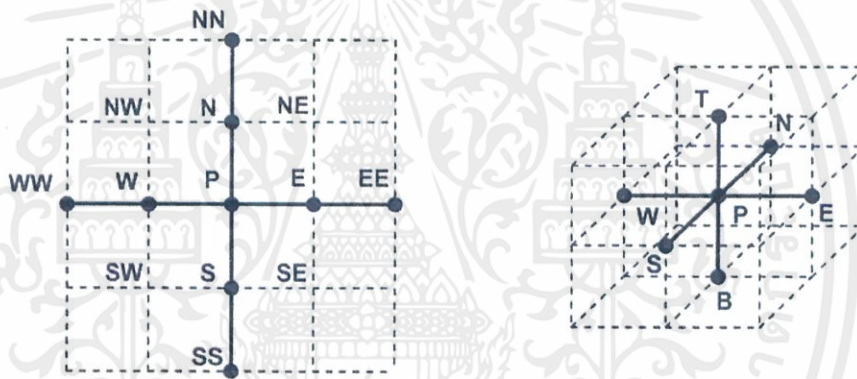
รูปที่ 3.8 แนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล แบ่งปัจจัยของความแน่นอนได้เป็น 3 ปัจจัยดังนี้  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

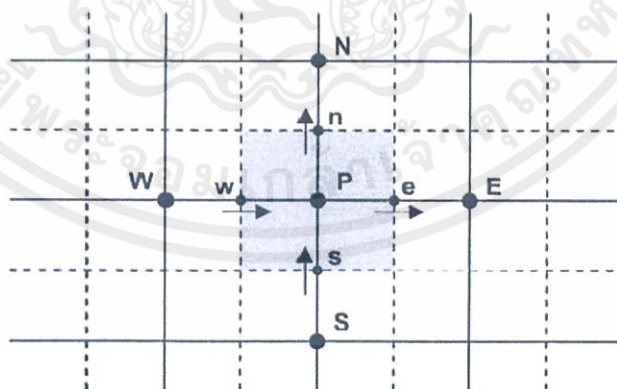
1. ความแน่นอนจากแบบจำลอง (Modeling accuracy) เกิดจากความเหมือนจริงของแบบจำลอง เทียบกับพฤติกรรมจริงธรรมชาติ
2. ความแน่นอนจากการดิสครีทไทต์ (Discretization accuracy) เกิดจากความเข้ากันได้ของสมการพีชคณิต เทียบกับสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย)
3. ความแน่นอนจากการแก้สมการพีชคณิต (Iteration accuracy) เกิดจากการลู่เข้าของ ผลเฉลยประมาณค่า เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการพีชคณิต

### 3.11 รูปแบบการจัดวางกริด

รูปแบบการจัดวางกริดโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ แบบโครงสร้างปกติ (Structured grids) แบบกลุ่มโครงสร้าง (Block structured grid) และแบบไม่เป็นโครงสร้าง (Unstructured grids) เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจกระบวนการดิสครีทไทต์ในหัวข้อถัดไป จึงได้ใช้รูปแบบการจัดวางกริดดังรูปที่ 3.9 (แบบโครงสร้างปกติ) และเพื่อความกระชับได้ดิสครีทไทต์กริด 2 มิติเท่านั้น ซึ่งสามารถขยายไปสู่กริดแบบ 3 มิติได้โดยตรง



รูปที่ 3.9 รูปแบบการจัดวางกริดในแกน 2 มิติ และ 3 มิติ



รูปที่ 3.10 ส่วนแรเงาแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 ตำแหน่ง P คือตำแหน่งโนด (Node) ที่สนใจ ตัวอักษรพิมพ์เล็ก เช่น w, e แสดงถึงตำแหน่งของปริมาณที่เข้า-ออกจากปริมาตรควบคุมที่แรงงา (Cell volume) เช่น ความเร็ว เป็นต้น เรียกว่า ตำแหน่งผิวเซลล์ (Cell face) ลูกศรที่ปรากฏแสดงทิศเป็นบวกของปริมาณเวกเตอร์ที่ตำแหน่งผิวเซลล์ รูปแบบลักษณะนี้ เรียกว่า การจัดเรียงแบบตำแหน่งร่วม (Co-located arrangement) กล่าวคือ ปริมาณสเกลาร์ และเวกเตอร์มีตำแหน่งเดียวกัน (มวล ความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การกำหนดปัญหาและตรวจสอบผลการคำนวณ

### 4.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้สำหรับทำการวิจัยและพร้อมทั้งทำการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ซึ่งลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนนี้เป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวโดยทำมุมปะทะ  $\alpha = 30^\circ$  และ  $45^\circ$  ตามลำดับ และอิทธิพลของความสูงของแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวซึ่งจะอธิบายในรูปของอัตราส่วนการบล็อก (Blockage ratio, BR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ และท่อกลมที่ใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวโดยทำมุมปะทะ  $\alpha = 30^\circ$  และ  $45^\circ$  ตามลำดับ และอิทธิพลของความสูงของแผ่นครีบริบรูปตัววีซึ่งจะอธิบายในรูปของอัตราส่วนการบล็อก (Blockage ratio, BR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ

### 4.2 สมการควบคุมและสมมติฐาน

การพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ได้มีสมมติฐานดังต่อไปนี้

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

จากสมมติฐานข้างต้น สำหรับการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส สมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน สามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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  $\Gamma$  คือการแพร่ทางความร้อน กำหนดโดย  $\Gamma = \mu / \text{Pr}$

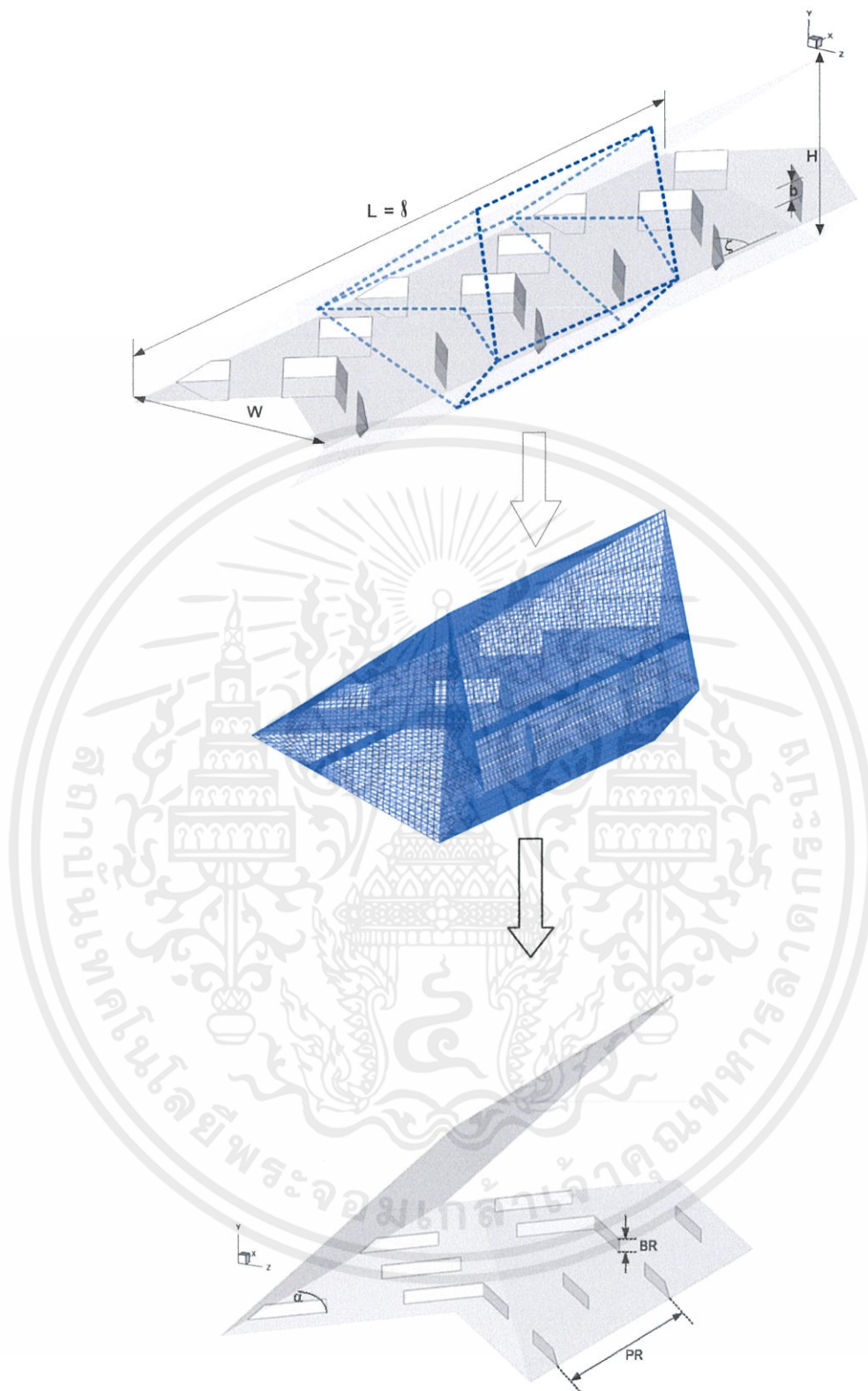
### 4.3 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ระบบที่ให้ความสนใจเป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลมที่ใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปร่างตัววีแบบแยกตัวภายในท่อ โดยใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปร่างตัววีแบบแยกตัววางเอียงทำมุมปะทะ  $\alpha = 30^\circ$  และ  $45^\circ$  ตามลำดับ ขนาดความสูงของครีบริบรูปร่างตัววีแบบแยกตัวมีค่า  $BR = 0.05, 0.10, 0.15$  และ  $0.20$  ตามลำดับ ระยะความห่างของครีบริบรูปร่างตัววีแบบแยกตัวแต่ละครีบริบ  $PR = 1$  และ  $PR = 1.5$  ขนาดความสูงของท่อหน้าตัดจัตุรัสที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า  $H = 0.05$  m และสมมติท่อยาวมาก ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นแบบ periodic ที่ทางเข้าและทางออก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ในกรณีศึกษาต่างๆได้แสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองสามมิติของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปร่างตัววีแบบแยกตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แบบจำลองสามมิติของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กริดที่ใช้สำหรับกรณีแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัววางเอียงและแผ่นกั้นรูปตัวยูวางเอียง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นแบบสี่เหลี่ยม แบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ(Non-uniform grid) คือจะพิจารณาบริเวณที่ติดผนังให้มีจำนวนกริดหนาแน่นและบริเวณที่ห่างออกไปจากผนังก็มีจำนวนกริดเบาบางลง ส่วนการหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบได้ทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณของกริดที่แตกต่างกัน ที่จำนวน 80,000 และ 120,000 ใช้ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE และใช้แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง เงื่อนไขการรู้เข้าหาคำตอบของทุกค่าอยู่ที่  $10^{-5}$  ยกเว้นสมการพลังงานซึ่งอยู่ที่  $10^{-9}$  พบว่าเมื่อจำนวนกริดเพิ่มขึ้นเป็น 120,000 ค่าเลขนัยเซิลท์มีความคาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง 1.6 % ส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานมีความคาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง 1.0 % ซึ่งทั้งค่าเลขนัยเซิลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานมีความสอดคล้องกันดีกับผลเฉลยแม่นยำตรง ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของ กริดที่ 80,000 ซึ่งปริมาณกริดนี้จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 4.1 ลักษณะกรณีศึกษาของ V-discrete ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

Case	Type	Flow	PR	Degree	BR
1	V-discrete	V-downstream	1	30	0.05
2					0.10
3					0.15
4					0.20
5				0.05	
6				0.10	
7				0.15	
8				0.20	
9			1.5	30	0.05
10					0.10
11					0.15
12					0.20
13				45	0.05
14					0.10
15					0.15
16					0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ลักษณะกรณีศึกษาของ V-discrete ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

Case	Type	Flow	PR	Degree	BR
1	V-discrete	V-upstream	1	30	0.05
2					0.10
3					0.15
4					0.20
5				45	0.05
6					0.10
7					0.15
8					0.20
9			1.5	30	0.05
10					0.10
11					0.15
12					0.20
13				45	0.05
14					0.10
15					0.15
16					0.20

ตารางที่ 4.3 ลักษณะกรณีศึกษาของ V-discrete ในท่อกลม

Case	Type	Flow	PR	Degree	BR
1	V-discrete	V-downstream	1	30	0.05
2					0.10
3					0.15
4					0.20
5				45	0.05
6			0.10		
7			0.15		
8			1.5	30	0.20
9					0.05
10			0.10		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case	Type	Flow	PR	Degree	BR
11					0.15
12					0.20
13				45	0.05
14					0.10
15					0.15
16					0.20

ตารางที่ 4.4 ลักษณะกรณีศึกษาของ V-discrete ในท่อกลม

Case	Type	Flow	PR	Degree	BR
1				30	0.05
2					0.10
3					0.15
4					0.20
5			1	45	0.05
6					0.10
7					0.15
8	V-discrete	V-upstream			0.20
9				30	0.05
10					0.10
11					0.15
12					0.20
13			1.5	45	0.05
14					0.10
15					0.15
16					0.20

#### 4.4 ค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

สำหรับการคำนวณในสามมิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

4.4.1 สภาวะทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translation อากาศไหลเข้าด้วยอัตราการ

ไหลเชิงมวลอย่างสม่ำเสมอ และมีค่าเลขพรานด์เทิล (Prandtl number; Pr) คงที่เท่ากับ 0.707

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

4.4.3 กำหนดให้ค่าพลักซ์ความร้อนของแผ่นออริฟิสและแผ่นครีบริบรูปร่างตัวยูมีค่าเท่ากับศูนย์ (แผ่นออริฟิสและแผ่นครีบริบรูปร่างตัวยูเป็นฉนวน)

4.4.4 กำหนดให้ที่ผนังทุกด้านของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีอุณหภูมิผนังคงที่ 310 K

#### 4.5 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution)

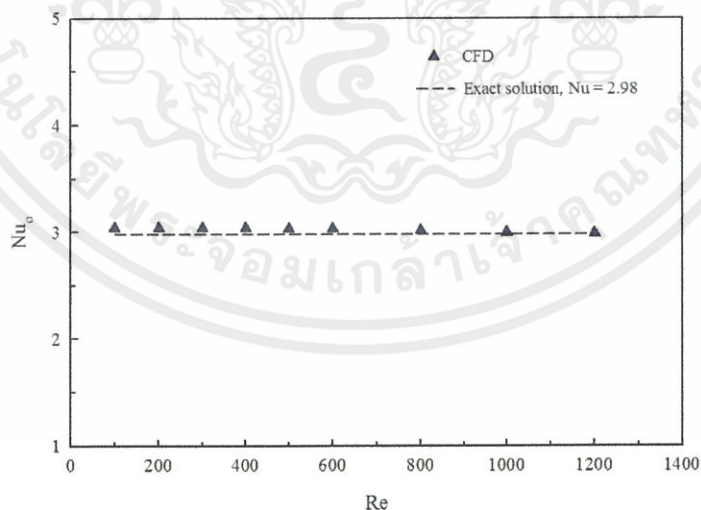
เนื่องจากผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นค่าที่ได้จากการประมาณ การคำนวณย่อมมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ดังนั้นในการนำโปรแกรมมาใช้งานต้องมีการตรวจสอบโปรแกรมว่าให้ผลเฉลยถูกต้องหรือไม่ การตรวจสอบโปรแกรมในหัวข้อนี้จะนำผลที่ได้จากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ

ผลเฉลยแม่นยำค่าเลขนัสเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว กรณีอุณหภูมิผนังคงที่จะได้

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

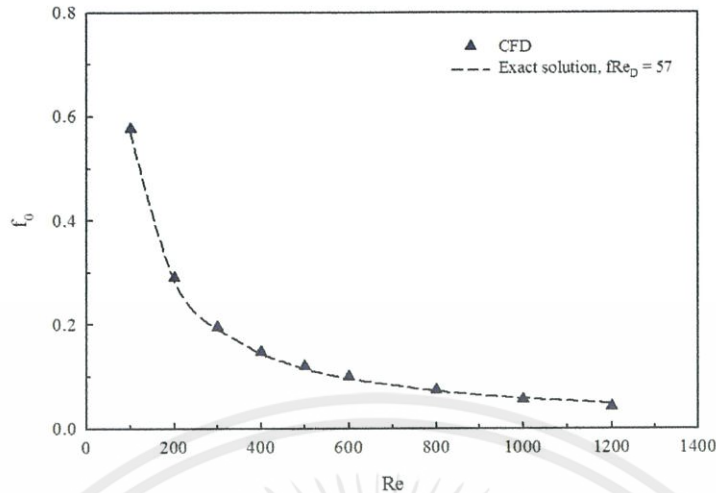
เช่นกันจะได้ค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

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



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำกับผลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำกับค่าที่ได้จากการจำลอง

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

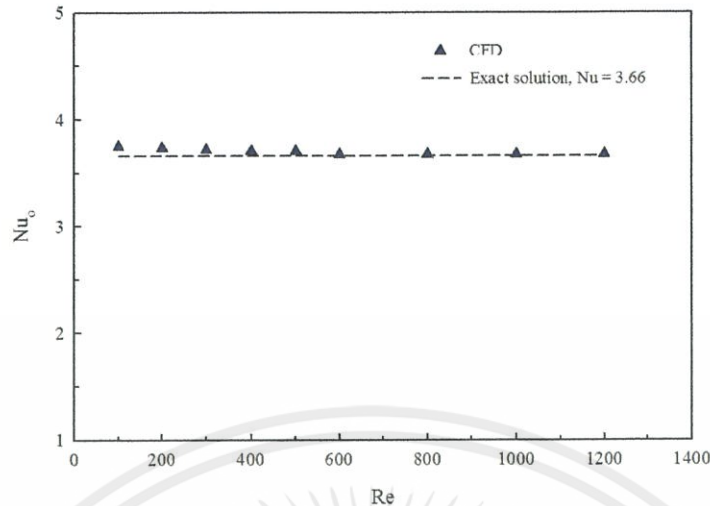
ผลเฉลยแม่นยำค่าเลขนีสเซลล์ท์ของท่อกลมสำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว กรณีอุณหภูมิผนังคงที่จะได้

$$Nu = 3.66 \quad (4.6)$$

เช่นกันจะได้ค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมสำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

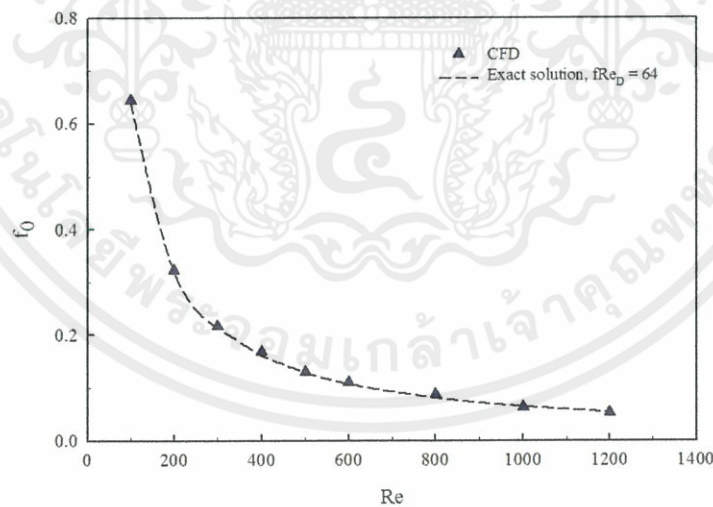
$$f = \frac{64}{Re} \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลท์ของท่อกลมผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับผลที่ได้จากการจำลอง

เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมจะมีความแตกต่างเฉลี่ย 1.5% ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ผลที่ได้จากทั้งโปรแกรมและจากผลเฉลยแม่นยำตรงให้ผลที่สอดคล้องกัน ทำให้ยืนยันได้ว่าแบบจำลองการไหล 3 มิติ รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้พื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม สามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลในการถ่ายเทความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ได้



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำกับค่าที่ได้จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย

### 5.1 บทนำ

โดยทั่วไปสมรรถนะเชิงความร้อนจะสัมพันธ์กับการสูญเสียความดันเนื่องจากความเสียดทาน การเพิ่มสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนมักจะได้มาพร้อมกับการสูญเสียความดันที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับของไหลที่มีความหนาแน่นต่ำ(ก๊าซ) การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมักจะนำไปสู่ความสิ้นเปลืองกำลังทางกลในรูปของพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์หรือพัดลม เพราะฉะนั้นการออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงจะต้องมีการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนในอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังทางกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนของไหล

ในบทนี้จะศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลมจากการจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งการถ่ายเทความร้อนได้แสดงในเทอมของเลขนัสเซลิต์ และผลของการสูญเสียความดันจะแสดงในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน จากพารามิเตอร์ทั้งสองนำมาสู่การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีอุณหภูมิผิวคงที่ (Constant Surface Temperature) โดยการศึกษาจะพิจารณาถึงอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส์และแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในรูปแบบต่างๆซึ่งได้ทำการศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่  $\alpha = 30^\circ$  และ  $45^\circ$  ตามลำดับ และอิทธิพลของความสูงของครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวซึ่งจะอธิบายในรูปของอัตราส่วนการบล็อค (Blockage ratio, BR) โดยมีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ โดยทำการศึกษาการไหลแบบลามินาร์ในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ 100 ถึง 1200

### 5.2 แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัว (V-discrete)

ในส่วนของหัวข้อนี้เราพิจารณาท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลมที่ใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัว ( $\alpha = 30^\circ$  และ  $45^\circ$ ) อยู่ภายในท่อ ในการจำลองนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนความสูงของครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวที่ค่าอัตราส่วนการบล็อค BR = 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลม

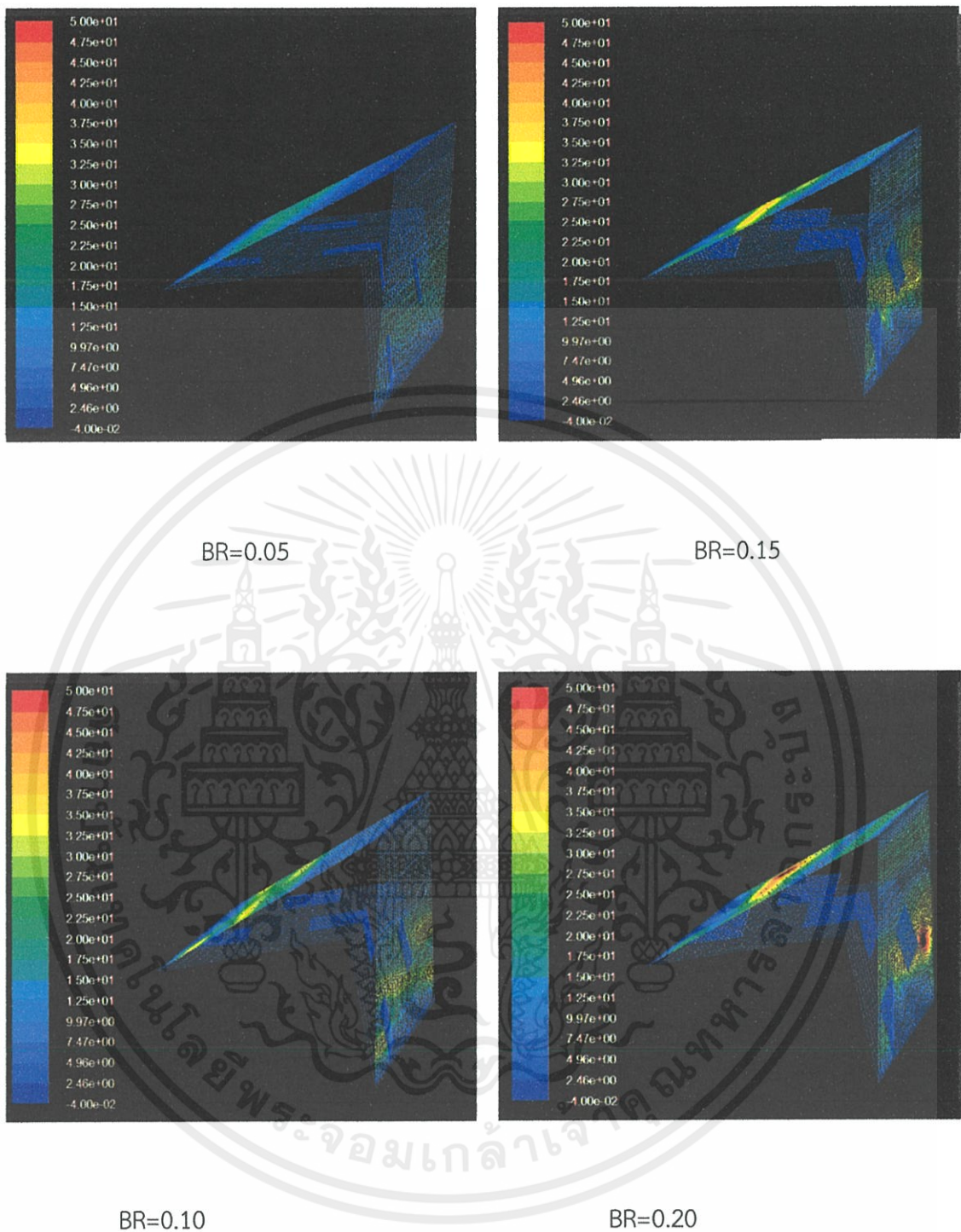
### 5.2.1 อิทธิพลของค่าอัตราส่วนการบล็อก

พิจารณารูปที่ 5.1 แสดงการกระจายตัวของเลขนับเซลล์ที่ผนังในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวที่เลขเรย์โนลด์สเท่ากับ 1200 และมุม  $30^\circ$  โดยเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการบล็อกที่  $BR = 0.05, 0.10, 0.15$  และ  $0.20$  ตามลำดับ พบว่าเมื่อค่า  $BR$  เพิ่มมากขึ้นจะมีค่าของเลขนับเซลล์ที่ผนังมากขึ้น โดยที่ค่า  $BR = 0.20$  จะมีค่าของเลขนับเซลล์ที่สูงที่สุด ตามด้วยกรณี  $BR = 0.15$  และ  $BR = 0.10$  ตามลำดับ

ในรูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนับเซลล์ซึ่งพิจารณาเลขนับเซลล์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวต่อเลขนับเซลล์ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบกับค่าเลขเรย์โนลด์ส โดยพิจารณาที่  $BR = 0.05, 0.10, 0.15$  และ  $0.20$  ตามลำดับ จากการจำลองพบว่าอัตราส่วนเลขนับเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส และยังพบว่าจากเลขเรย์โนลด์สช่วง 100-1200 กรณีค่า  $BR = 0.20$  ให้อัตราส่วนเลขนับเซลล์ที่สูงที่สุดซึ่งมีค่า 5.89 เท่าของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบตามด้วยกรณี  $BR = 0.15, 0.10$  และ  $BR = 0.05$  ซึ่งให้ค่าเลขนับเซลล์ที่สูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 5.32, 4.54 และ 2.59 เท่า ตามลำดับ

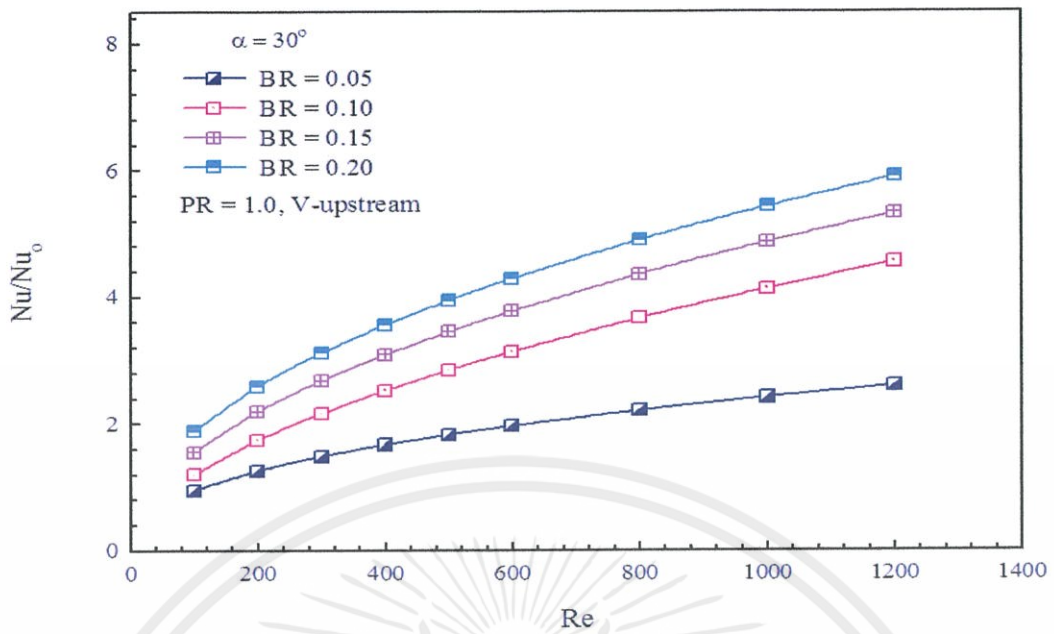
ในรูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานซึ่งพิจารณาตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบกับเลขเรย์โนลด์ส จากการจำลองท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวที่  $BR = 0.05, 0.10, 0.15$  และ  $0.20$  ตามลำดับ พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น ทุกค่าเลขเรย์โนลด์สที่ใช้ในการจำลอง กรณี  $BR = 0.20$  จะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 18.99 เท่า ตามด้วยกรณี  $BR = 0.15, 0.10$  และ  $BR = 0.05$  ตามลำดับ โดยให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 14.04, 9.27 และ 4.76 เท่า ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

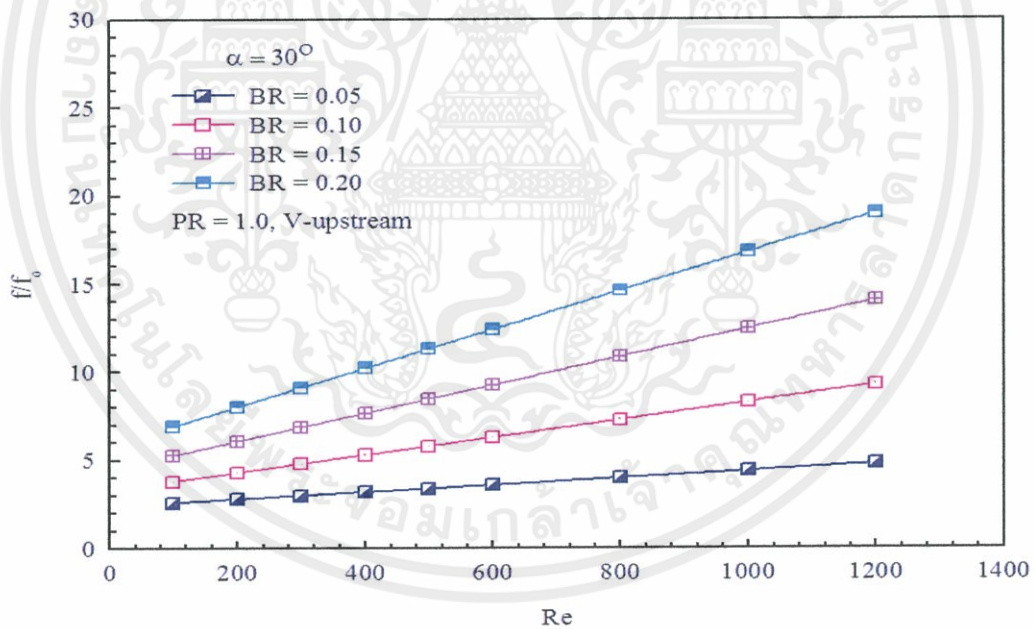


รูปที่ 5.1 การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ที่ผนังในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบตัววีแบบ  
แยกตัวที่  $Re = 1200$  และมุม  $30^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



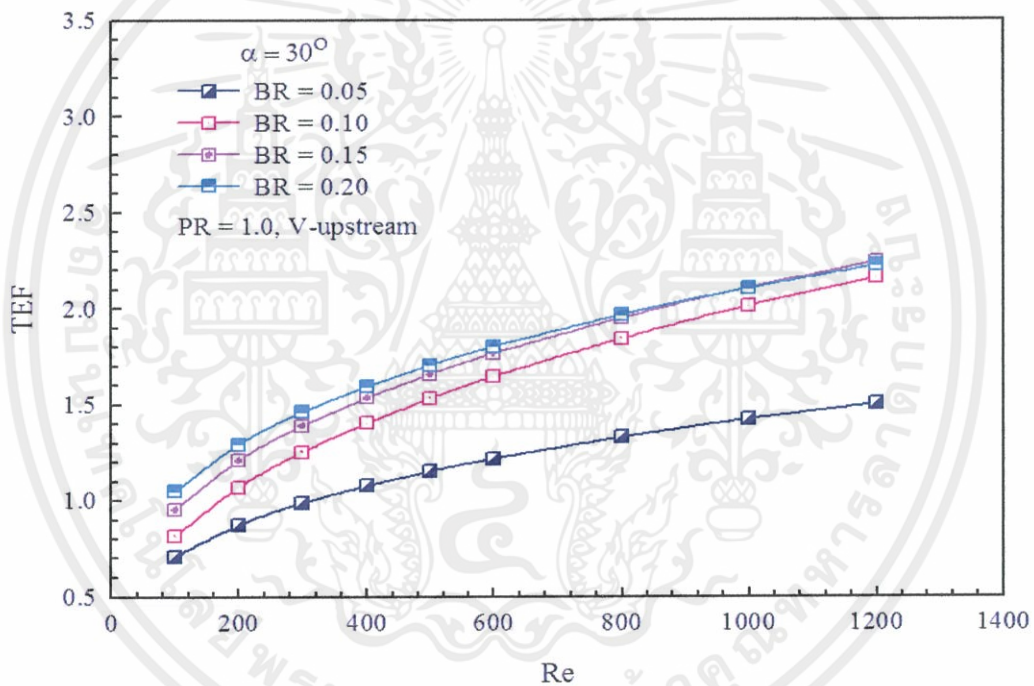
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวที่ค่า BR ต่างๆ



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวที่ค่า BR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ส์ของการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวที่  $BR = 0.05, 0.10, 0.15$ , และ  $BR = 0.20$  ตามลำดับ พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวที่ค่า  $BR$  ต่างๆ เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มสูงมากขึ้นทำให้เกิดการไหลหมุนวนมากขึ้นจึงมีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นเป็นผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้น และพบว่าจากช่วงค่าเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ กรณี  $BR = 0.10$  ถ้าแผ่นกันมีอัตราส่วนการบล็อคน้อยๆ เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มสูงขึ้นกระแสการไหลส่วนใหญ่จะข้ามแผ่นครีบริบไป ซึ่งเกิดการหมุนวนที่บริเวณด้านหลังแผ่นครีบริบน้อยทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้อยจึงส่งผลให้ ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนลดลง และยังพบว่าจากช่วงค่าเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ กรณี  $BR = 0.15$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.24 ตามด้วยกรณี  $BR = 0.20, 0.10$  และ  $0.05$  ตามลำดับ โดยมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 2.22, 2.16 และ 1.49 ตามลำดับ

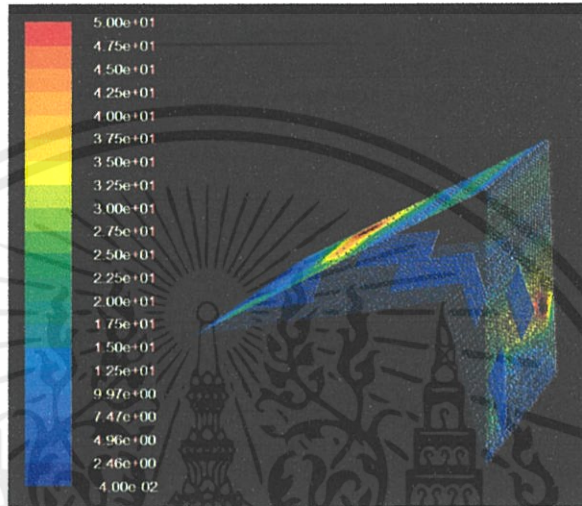


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับกรณีท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวที่ค่า  $BR$  ต่างๆ

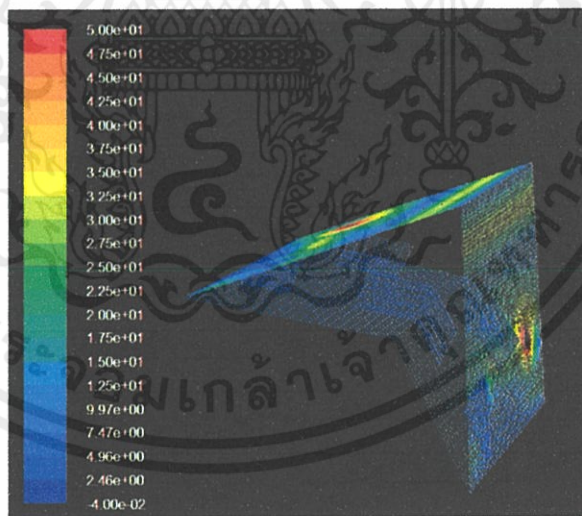
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 อิทธิพลของมุมปะทะ

ในรูปที่ 5.5 แสดงการกระจายของค่าของเลขนัสเซลล์ที่ผนังท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบตัววีแบบแยกตัวที่  $\alpha = 30^\circ$  และ  $45^\circ$  ตามลำดับ ที่ค่า  $BR = 0.20$  และ  $Re = 1200$  พบว่าช่วง  $\alpha = 45^\circ$  จะมีค่าของเลขนัสเซลล์ที่บริเวณผนังด้านข้างสูงมากกว่าที่ผนังด้านอื่นๆ เมื่อค่ามุมปะทะเพิ่มขึ้น จะมีค่าของเลขนัสเซลล์ที่ผนังมากขึ้น และยังพบว่ากรณี  $\alpha = 45^\circ$  จะให้ค่าของเลขนัสเซลล์ที่ผนังมากที่สุด ตามด้วยกรณี  $\alpha = 30^\circ$



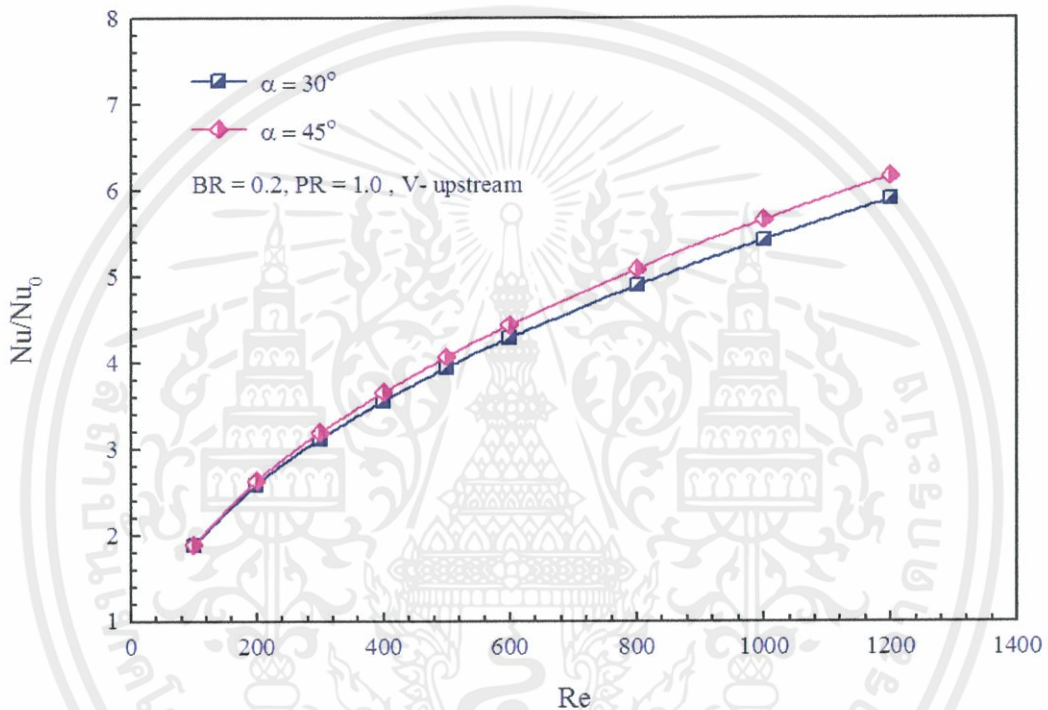
$\alpha=30^\circ$



$\alpha=45^\circ$

รูปที่ 5.5 การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ที่ผนังท่อกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบตัววีแบบแยกตัวที่มุมปะทะเอกสารนี้เป็นเอกสารต่างๆที่ค่า  $BR = 0.20$  และ  $Re = 1200$  ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

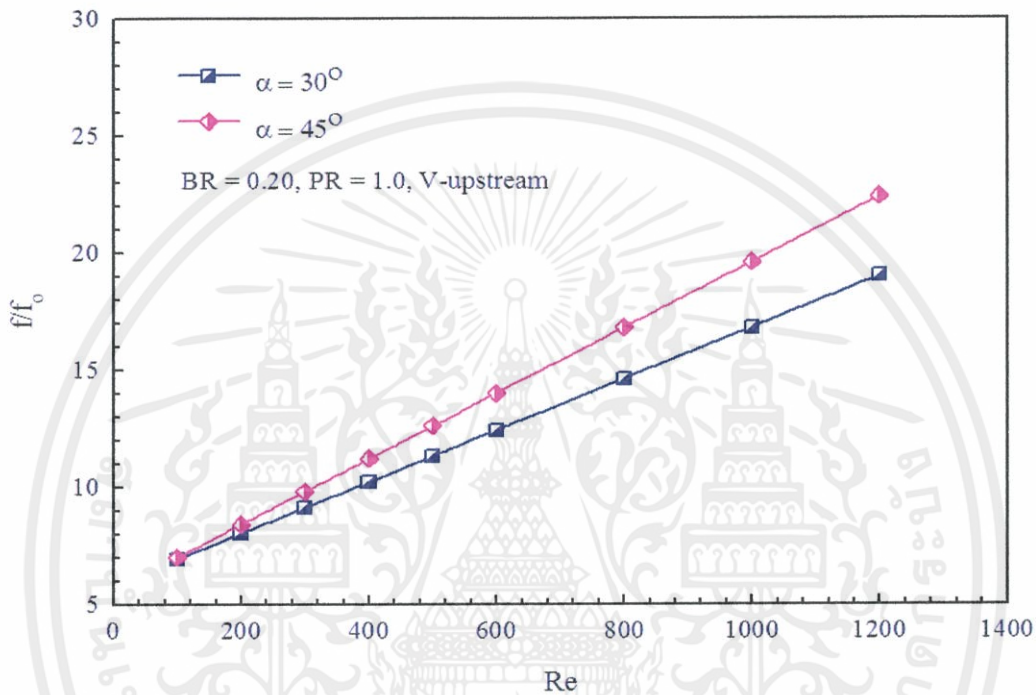
ในรูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์กับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวทำมุมปะทะ  $\alpha = 30^\circ$  และ  $45^\circ$  ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการบล็อก  $BR = 0.20$  และ  $PR = 1$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวทุกกรณีจะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์และยังพบว่ากรณี  $\alpha = 45^\circ$  จะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์สูงสุดทุกค่าอัตราส่วนการบล็อกที่พิจารณา ตามด้วยกรณี  $\alpha = 30^\circ$



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

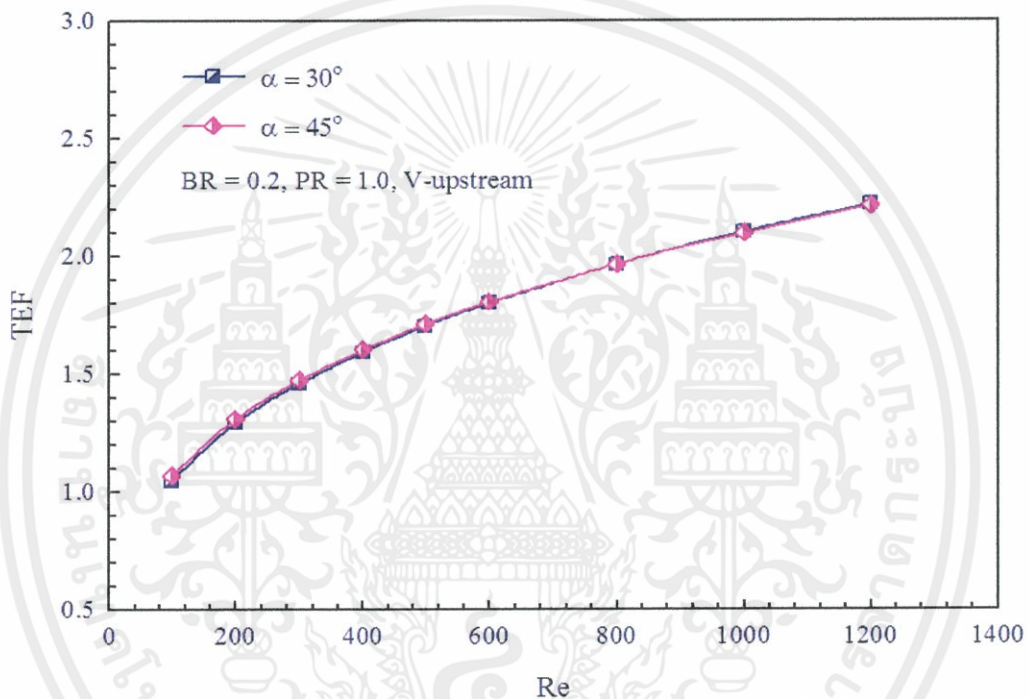
ในรูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครึ่งรูปตัววีแบบแยกตัวทำมุมปะทะ  $\alpha = 30^\circ$  และ  $45^\circ$  ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการบล็อก  $BR = 0.20$  และ  $PR = 1$  พบว่าในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลองทุกกรณี มุมปะทะจะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ ซึ่งในกรณี  $\alpha = 45^\circ$  ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงสุดในทุกอัตราส่วนการบล็อกที่พิจารณา ตามด้วยกรณี  $\alpha = 30^\circ$



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ส์ของการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวทำมุมปะทะ  $\alpha = 30^\circ$  และ  $45^\circ$  ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนการบล็อก,  $BR = 0.20$  และ  $PR = 1$  พบว่าในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลองทุกกรณีมุมปะทะจะให้ค่า TEF เพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นและมีค่า TEF มากกว่าหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ มุมปะทะทั้งสองนี้ให้การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ และจะพบว่ากรณีมุมปะทะ  $\alpha = 30^\circ$  จะให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อ ผิวเรียบถึง 2.22 เท่า

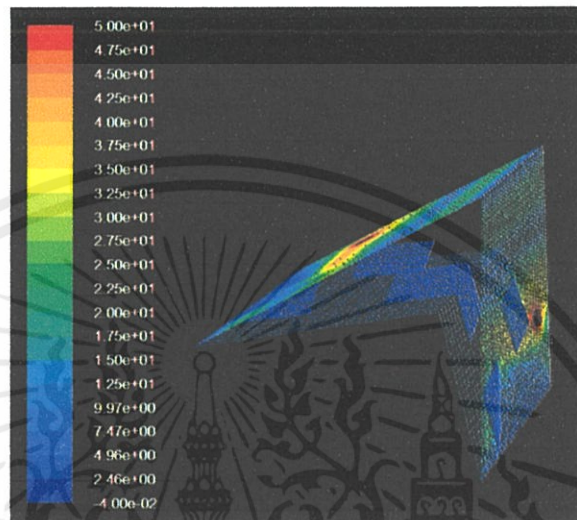


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มุมปะทะต่างๆ ที่  $BR = 0.20$

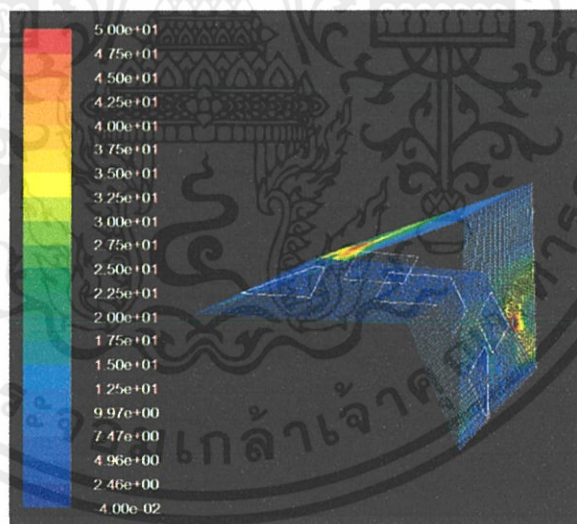
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.3 อิทธิพลของค่าระยะห่างระหว่างแผ่นครีบริบ

พิจารณารูปที่ 5.9 แสดงค่าของเลขนัสเซลล์ท์ที่ผนังท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัว  $BR = 0.20$  มุม  $30^\circ$  และ  $Re = 1200$  โดยเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวที่  $PR = 1$  และ  $1.5$  พบว่าผนังด้านข้างทั้งสองมีค่าของเลขนัสเซลล์ท์ที่สมมาตรกัน เมื่อระยะห่างระหว่างครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวเพิ่มมากขึ้นจะมีค่าของเลขนัสเซลล์ท์ที่ผนังลดลง



PR = 1



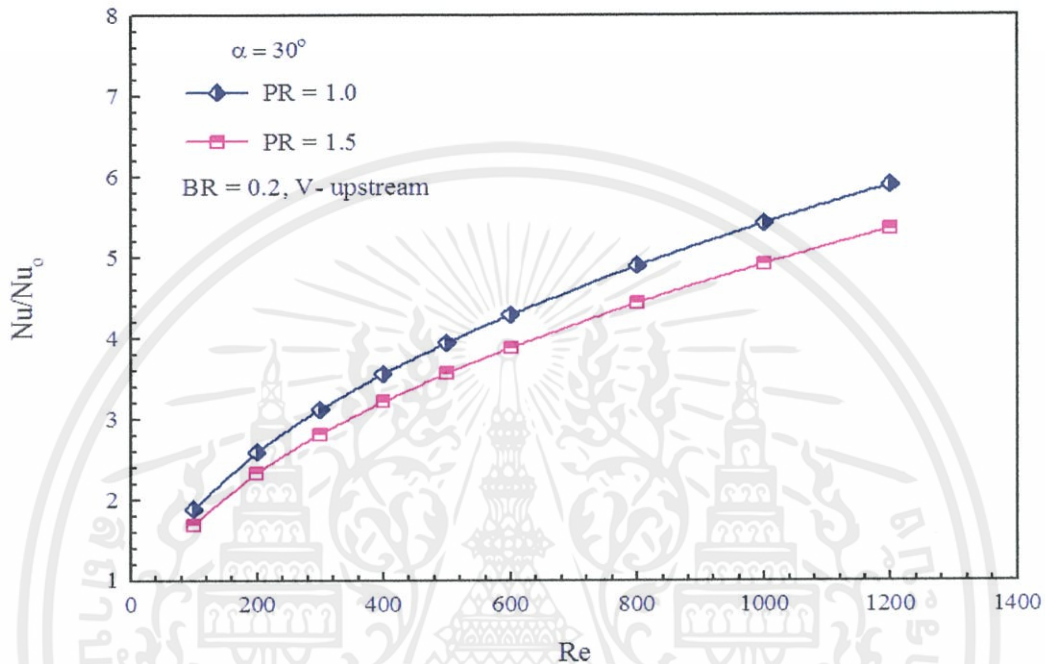
PR = 1.5

**รูปที่ 5.9** การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ท์ที่ผนังท่อกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวที่ค่า PR

ต่างๆ โดยที่  $\alpha = 30^\circ$ ,  $Re = 1200$  และ  $BR = 0.20$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.10 จากการจำลองพบว่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และ ยังพบว่าจากเลขเรย์โนลด์ส์ช่วง 100-1200 กรณีค่า PR=1 ให้อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่สูงที่สุดซึ่งมีค่า 5.89 เท่าของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ ตามด้วยกรณี PR = 1.5 ซึ่งให้ค่าเลขนัสเซลล์ที่สูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 5.35



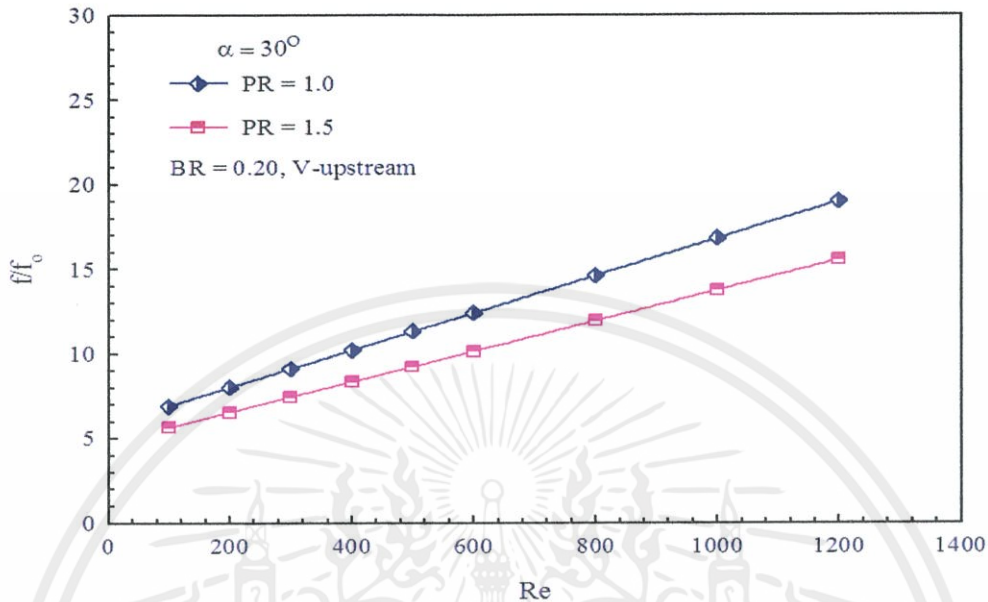
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ค่า PR ต่างๆ

ในรูปที่ 5.11 จากการจำลองท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวที่มีระยะห่างระหว่างแผ่น PR = 1 และ 1.5 ตามลำดับ ที่ค่า BR = 0.20 และมุม 30° พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นทุกค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลอง กรณี PR = 1 จะให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 18.99 เท่า ตามด้วยกรณี PR = 1.5 โดยให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 15.52

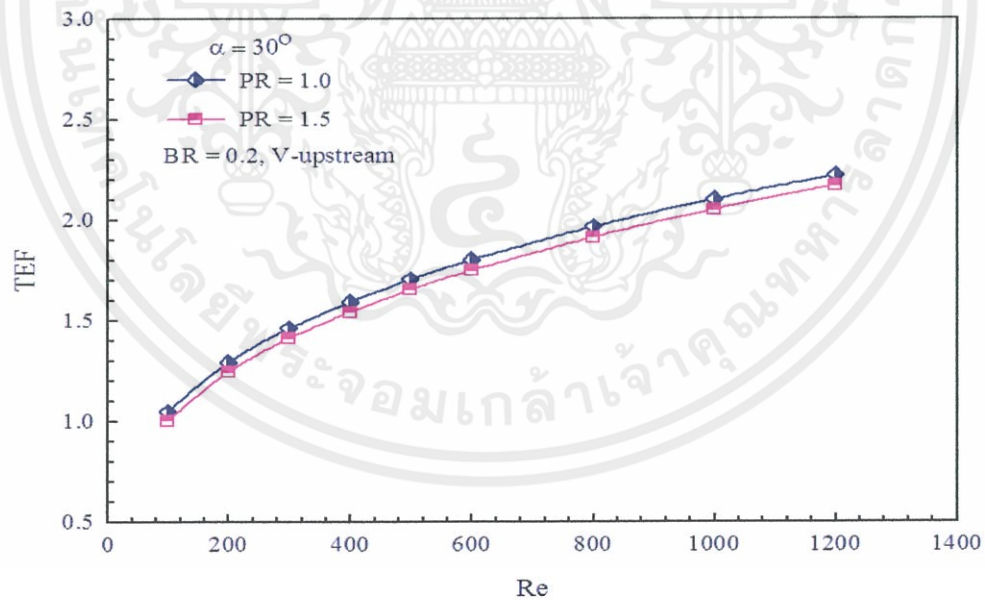
ในรูปที่ 5.12 พบว่าในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลองทุกกรณีมุมปะทะจะให้ค่า TEF เพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นและมีค่า TEF มากกว่าหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่มุมปะทะทั้งสองนี้ให้การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ และจะพบว่ากรณี PR=1 จะให้สมรรถนะการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบถึง 2.24 เท่า ตามด้วยกรณี PR=1.5 โดยให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 2.16



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาที่ PR = 1 และ 1.5 ตามลำดับที่ค่า BR = 0.20 และมุม  $30^\circ$

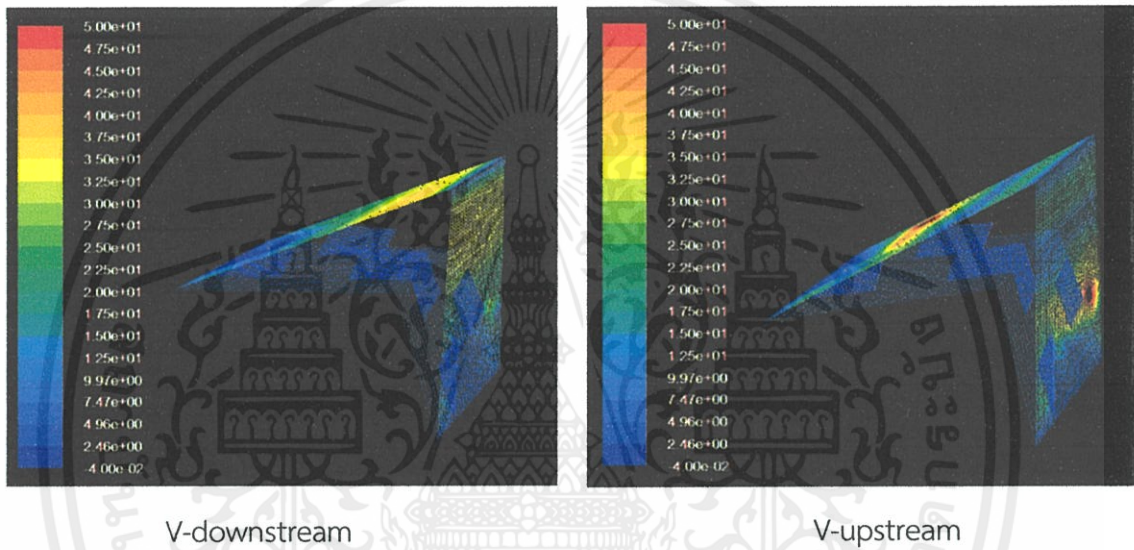


รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน TEF กับเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาที่ PR = 1 และ 1.5 ตามลำดับที่ค่า BR = 0.20 และมุม  $30^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.4 อิทธิพลของทิศทางการไหล

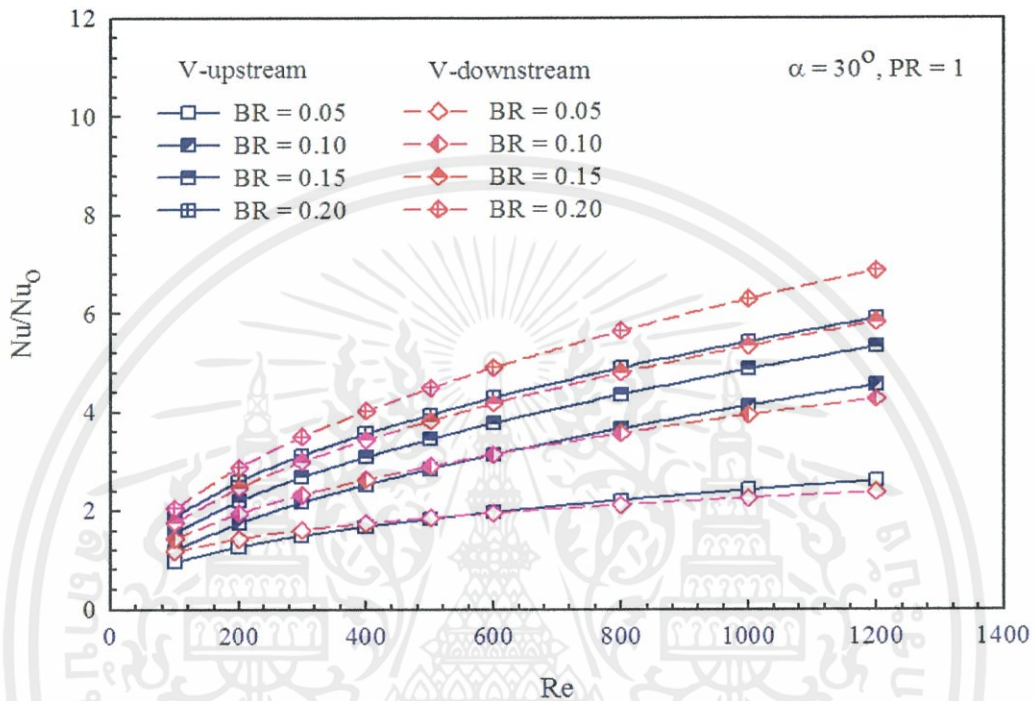
พิจารณารูปที่ 5.13 แสดงค่าของเลขนัสเซลล์ที่ผนังท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีสไแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัว  $BR = 0.20$  มุม  $30^\circ$  และ  $Re = 1200$  โดยเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลระหว่างการไหลแบบ V-downstream และการไหลแบบ V-upstream พบว่าผนังด้านข้างของแต่ละการไหลมีค่าของเลขนัสเซลล์ที่ต่างกัน ซึ่งการไหลแบบ V-downstream จะให้ค่าการกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ที่ทั่วทั้งผิวท่อ แต่การไหลแบบ V-upstream จะให้ค่าการกระจายตัวของเลขนัสเซลล์บริเวณด้านหน้าครีบมากกว่าด้านอื่นๆ และการไหลแบบ V-downstream จะให้ค่านัสเซลล์ที่สูงกว่า การไหลแบบ V-upstream



รูปที่ 5.13 การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ที่ผนังท่อกรณีสไแผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวที่มีการไหลแบบ V-downstream และ V-upstream โดยที่  $\alpha = 30^\circ$ ,  $Re = 1200$  และ  $BR = 0.20$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

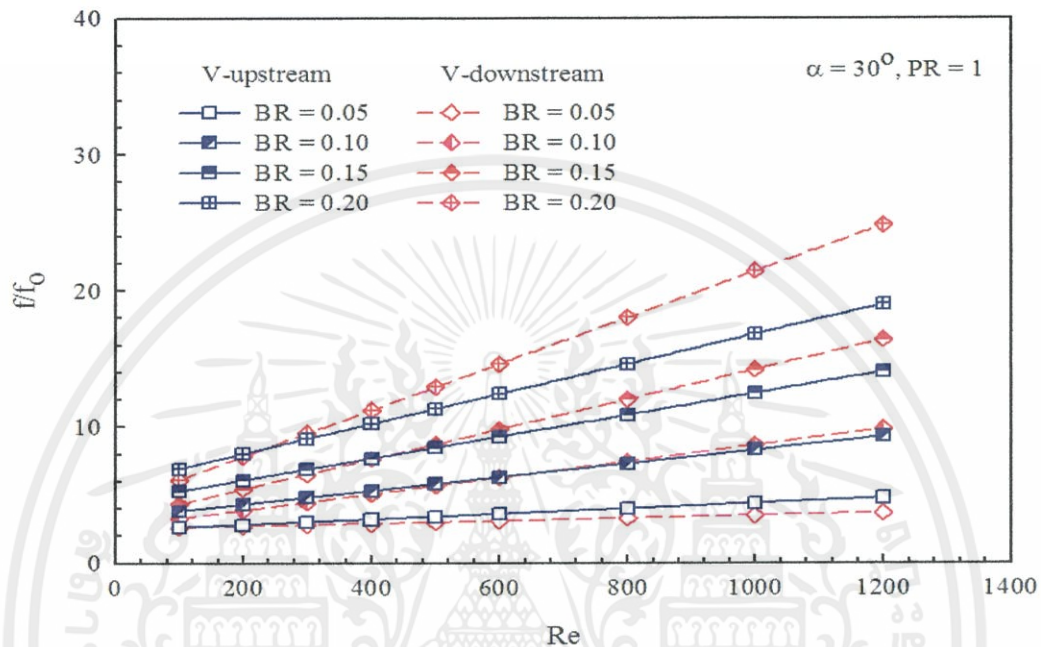
ในรูปที่ 5.14 จากการจำลองพบว่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และ ยังพบว่าจากเลขเรย์โนลด์ส์ช่วง 100-1200 กรณีการไหลแบบ V-downstream ให้อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ สูงที่สุดซึ่งมีค่า 6.87 เท่าของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ ตามด้วยกรณี การไหลแบบ V-upstream ซึ่งให้ค่า เลขนัสเซิลท์ที่สูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 5.35



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่การไหลแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

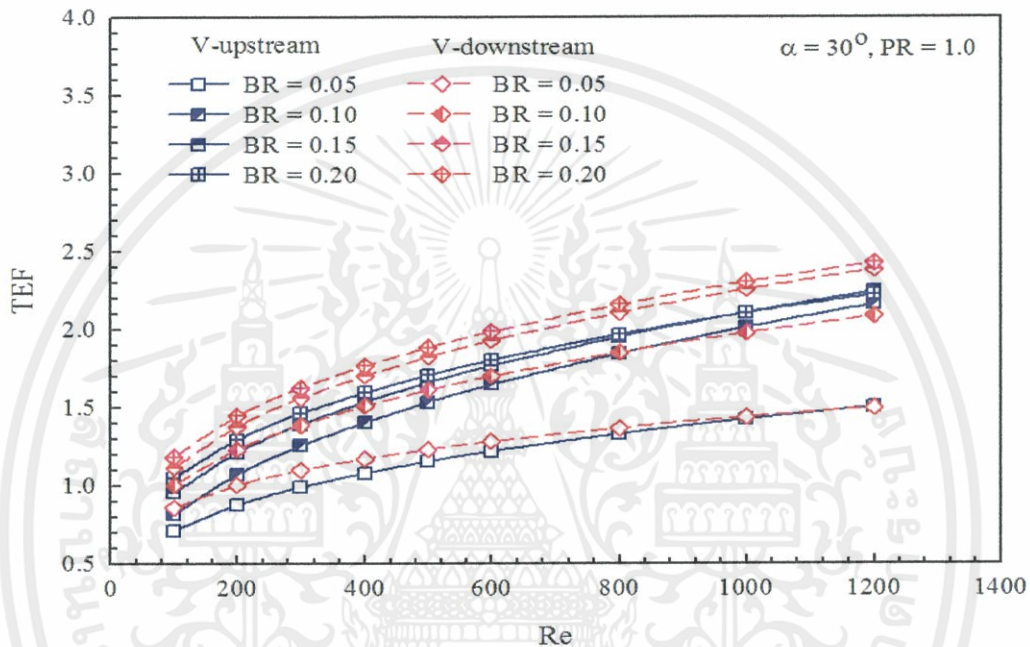
ในรูปที่ 5.15 จากการจำลองพบว่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และยังพบว่าจากเลขเรย์โนลด์ส์ช่วง 100-1200 กรณีการไหลแบบ V-downstream ให้อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์สูงที่สุดซึ่งมีค่า 24.79 เท่าของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ ตามด้วยกรณี การไหลแบบ V-upstream ซึ่งให้ค่าเลขนัสเซิลท์ที่สูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 18.99



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาการไหลแบบ V-downstream และ การไหลแบบ V-upstream ที่ค่า BR = 0.20 และมุม  $30^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.16 พบว่าในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลองทุกกรณีมุมปะทะจะให้ค่า TEF เพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นและมีค่า TEF มากกว่าหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่มุมปะทะทั้งสองนี้ให้การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ และจะพบว่ากรณีการไหลแบบ V-downstream จะให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบถึง 2.42 เท่า ตามด้วยกรณีการไหลแบบ V-upstream โดยให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 2.24

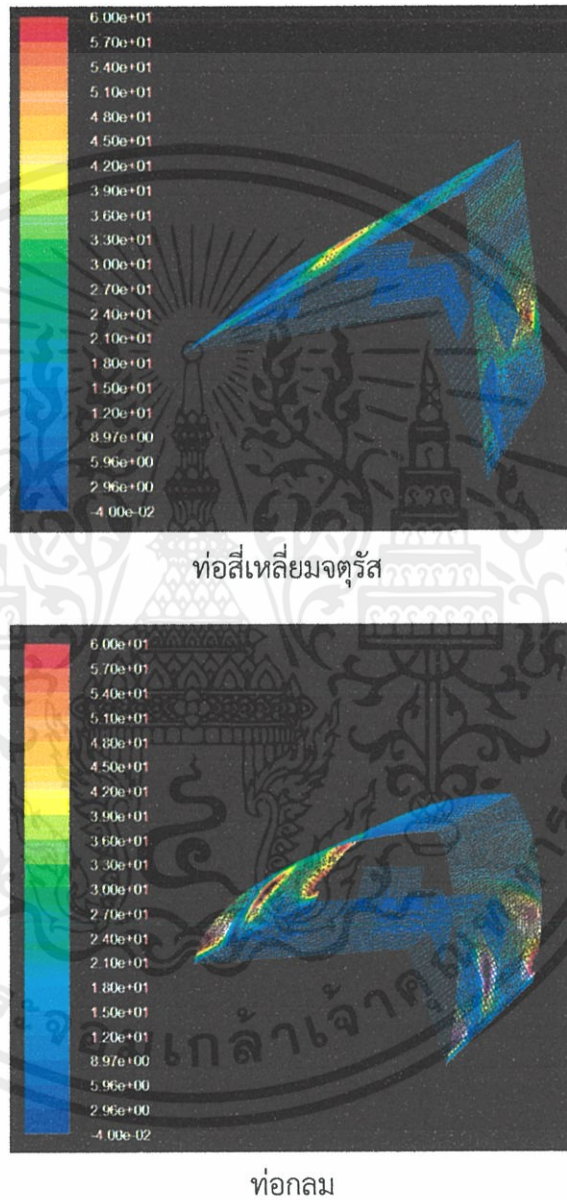


รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน TEF กับเลขเรย์โนลด์ส์ โดยพิจารณาการไหลแบบ V-downstream และ การไหลแบบ V-upstream ที่ค่า BR = 0.20 และมุม  $30^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.5 อิทธิพลของรูปแบบท่อ

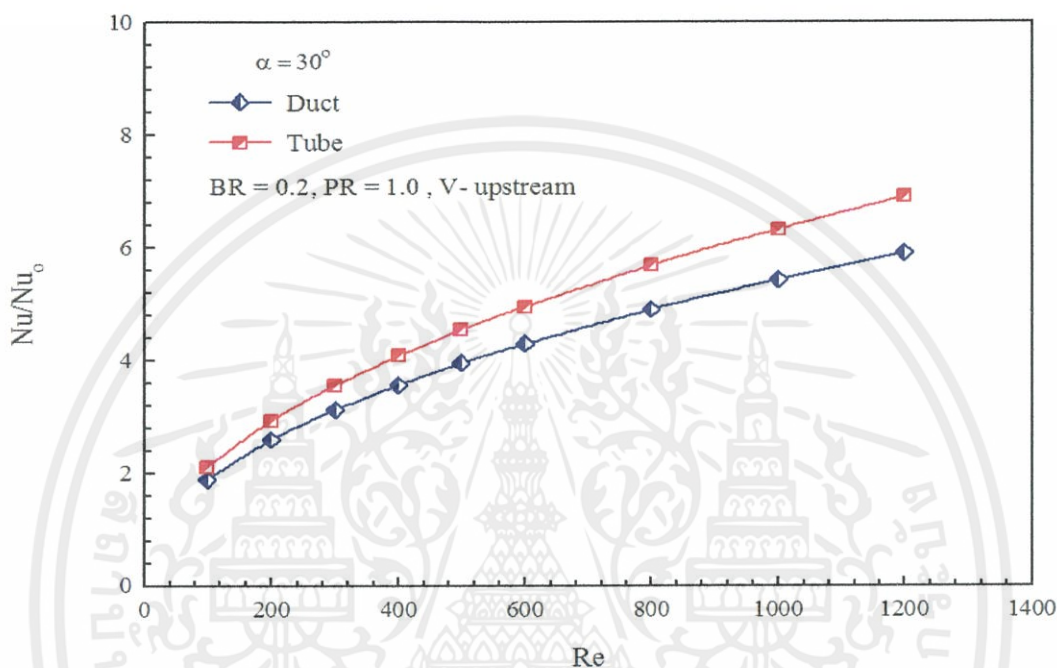
พิจารณารูปที่ 5.17 แสดงค่าของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลมกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัว  $BR = 0.20$ , มุม  $30^\circ$ ,  $PR = 1$  และ  $Re = 1200$  พบว่าผนังด้านข้างทั้งสองมีค่าของเลขนัสเซิลท์ที่สมมาตรกัน และการใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในท่อกลมจะให้ค่าของเลขนัสเซิลท์มากกว่าการใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 5.17 การกระจายตัวของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังท่อกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในท่อกลม และท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยที่  $\alpha = 30^\circ$ ,  $Re = 1200$  และ  $BR = 0.20$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ซึ่งห้ามเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.18 จากการจำลองพบว่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และยังพบว่าจากเลขเรย์โนลด์ส์ช่วง 100-1200 กรณีสไล์แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ให้อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์สูงสุดซึ่งมีค่า 5.89 เท่าของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ ตามด้วยกรณี กรณีสไล์แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในท่อกกลม ซึ่งให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ที่สูงกว่าท่อกกลมผิวเรียบ เท่ากับ 6.89



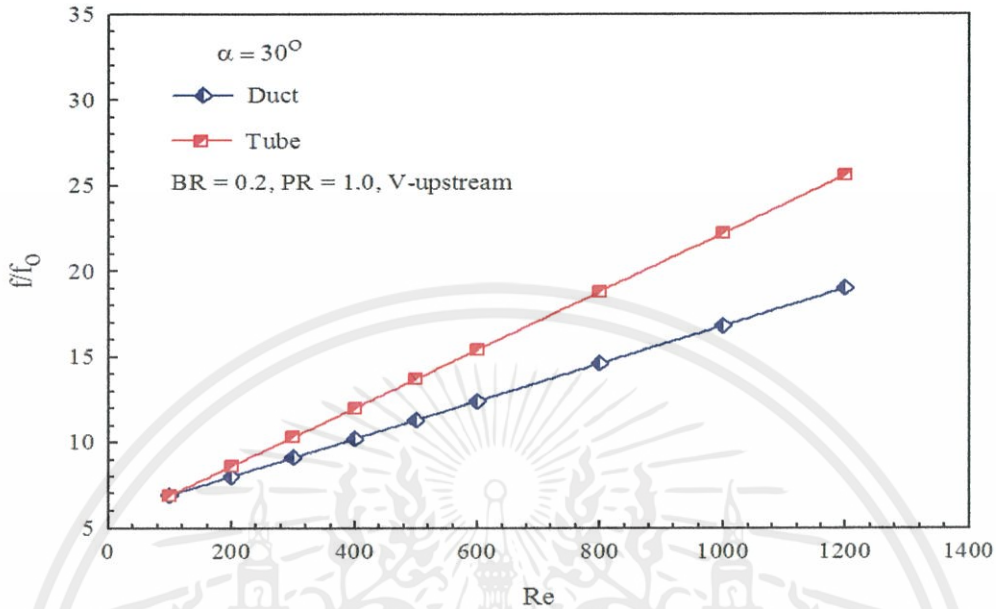
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ที่มีแบบท่อแบบต่างๆ

ในรูปที่ 5.19 จากการจำลองพบว่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ และยังพบว่าจากเลขเรย์โนลด์ส์ช่วง 100-1200 กรณีสไล์แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ให้อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์สูงสุดซึ่งมีค่า 18.99 เท่าของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ ตามด้วยกรณี กรณีสไล์แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในท่อกกลม ซึ่งให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ที่สูงกว่าท่อกกลมผิวเรียบเท่ากับ 25.58

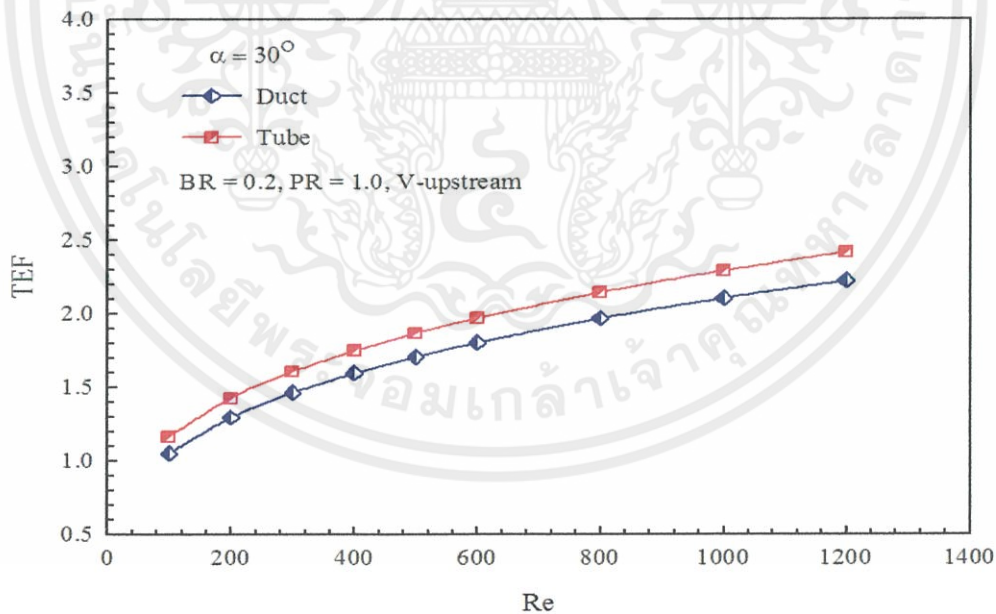
ในรูปที่ 5.20 พบว่าในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้ในการจำลองทุกกรณีมุมปะทะจะให้ค่า TEF เพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นและมีค่า TEF มากกว่าหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่มุมปะทะทั้งสองนี้ให้การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นกว่าท่อผิวเรียบ และจะพบว่ากรณีสไล์แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในท่อกกลมจะให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบถึง 2.48 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่า ตามด้วยกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบเท่ากับ 2.24



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส กรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในท่อกลมและท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยที่  $\alpha = 30^\circ$  และ  $BR = 0.20$



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน TEF กับ เลขเรย์โนลด์ส กรณีใส่แผ่นบางติดครีบริบรูปตัววีแบบแยกตัวในท่อกลมและท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยที่  $\alpha = 30^\circ$  และ  $BR = 0.20$

เอกสารนี้เป็นเอกสารในโครงการวิจัยของศูนย์วิจัยและพัฒนาเครื่องจักรกลและระบบอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส์จะทำให้อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่สูงขึ้น

อิทธิพลของอัตราส่วนความสูงของแผ่นครีบต่อความสูงของท่อ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อขนาดของอัตราส่วนความสูงของแผ่นครีบต่อความสูงของท่อ (BR) มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า  $BR = 0.20$  จะมีค่าการกระจายของเลขนัสเซิลท์สูงสุด แต่กลับส่งผลให้มีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดจึงส่งผลให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนต่ำ ซึ่งจากการจำลองเชิงตัวเลขกรณี  $BR = 0.15$  จะให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.24

อิทธิพลของมุมปะทะ จากผลการจำลองเชิงตัวเลขพบว่าเมื่อมุมเพิ่มขึ้นจะมีการกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า  $\alpha = 45^\circ$  จะมีค่ามีการกระจายของเลขนัสเซิลท์สูงสุด แต่จะทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดเช่นกัน จึงส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนต่ำ ซึ่งจากการทดลองกรณีมุมปะทะ  $\alpha = 30^\circ$  จะให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.22

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นครีบ พบว่าเมื่อค่า PR เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้มีการกระจายของเลขนัสเซิลท์ที่ผนังน้อยลง โดยที่ค่า  $PR = 1$  จะมีค่ามีการกระจายของเลขนัสเซิลท์สูงสุดและจะพบว่ากรณี  $PR = 1$  จะให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.24

อิทธิพลของการไหล พบว่าผนังด้านข้างของแต่ละการไหลมีค่าของเลขนัสเซิลท์ที่ต่างกัน ซึ่งการไหลแบบ V-downstream จะให้ค่าการกระจายตัวของเลขนัสเซิลท์ทั่วทั้งผิวท่อ แต่การไหลแบบ V-upstream จะให้ค่าการกระจายตัวของเลขนัสเซิลท์บริเวณด้านหน้าครีบมากกว่าด้านอื่นๆ และการไหลแบบ V-downstream จะให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการไหลแบบ V-upstream

อิทธิพลของรูปแบบท่อจากผลการจำลองเชิงตัวเลข พบว่ากรณีการใส่แผ่นบางติดครีบบูบตัววีแบบแยกตัวในท่อสี่เหลี่ยมกลมจะให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากกว่ากรณีใส่แผ่นบางติดครีบบูบตัววีแบบแยกตัวในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบของแต่ละกรณี

### 6.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ระเบียบวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลของการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลมกรณีใส่แผ่นบางติดครีบบูบตัววีแบบแยกตัวแบบต่างๆ สามารถใช้เป็นเครื่องมือเพื่อการวิเคราะห์ผลและย้ำความมั่นใจ ก่อนเข้าสู่กระบวนการออกแบบจริงได้ ซึ่งมีความสะดวกและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการสร้างเครื่องทดลองเพื่อใช้ในการทดลอง สำหรับผลจากการศึกษานี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้เผยแพร่ไปบนเว็บไซต์หรือสื่ออิเล็กทรอนิกส์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและออกแบบกรณีใส่แผ่นบางติดครีบริปูตัววีแบบแยกตัวภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและท่อกลมให้มีความเหมาะสมได้

สามารถนำไปเป็นแนวทางในการวิจัยระดับสูงต่อไป เช่น การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนภายในท่อจัตุรัสและท่อกลมที่ใส่แผ่นบางติดครีบริปูตัววีโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในการคำนวณสามมิติ การศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดวางของครีบริปูตัววีแบบอื่นๆ เป็นต้น

ในการทำการจำลองนั้นผลที่ได้ไม่สามารถทราบล่วงหน้าได้ ดังนั้นในการทำวิจัยสำหรับการจำลองควรที่จะปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ อย่างละเอียด อย่างมีระบบ มีแบบแผน จะทำให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีเหมาะสมกับลักษณะงานที่ใช้ที่สุดได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Sripattanapipat. S. and Promvong. 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] Metzger, D.E., Fan, C.S. and Yu, Y. 1990. "Effects of Rib Angle and Orientation on Local Heat Transfer in Square Channels with Angled Roughness Ribs." in: R.K. Shah, A.D. Kraus, D.E. Metzger, *Compact Heat Exchangers*, Hemisphere, Washington.
- [3] Han, J.C., and Y.M. Zhang. 1992. "High performance heat transfer ducts with parallel broken and V-shaped broken ribs." *Int. J. Heat Mass Transfer*. 35: 513-523.
- [4] Liou, T.M. and Hwang, J.J. 1992. "Turbulent heat transfers augmentation and friction in periodic fully developed channel flows." *ASME, J. Heat Transfer*. 114: 56-64.
- [5] Liou, T.M. and Hwang, J.J. 1993. "Effect of ridge shapes on turbulent heat transfer and friction in a rectangular channel." *Int. J. Heat Mass Transfer*. 36: 931-940.
- [6] Zhang, Y.M., Gu, W.Z. and Han, J.C. 1994. "Heat transfer and friction in rectangular channels with ribbed or ribbed-grooved walls." *ASME J. Heat Transfer*. 116: 58-65.
- [7] Gentry, M.C. and Jacobi, A.M. 1997. "Heat transfer enhancement by delta-wing vortex generators on a flat plate: vortex interactions with the boundary layer." *Exp. Thermal Fluid Science*. 14: 231-242.
- [8] Olsson, C.O. and Sunden, B. 1998. "Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels." *Exp. Thermal Fluid Science*. 16: 349-365.
- [9] Gao, X. and Sunden, B. 2001. "Heat transfer and pressure drop measurements in rib-roughened rectangular ducts." *Int. J. Heat Thermal Fluid*. 24: 25-34.
- [10] Choi, C., Rhee, D.H. and Cho, H.H. 2002. "Heat/mass transfer and pressure drop in a square duct with V-shaped ribs." *ASME. J. Heat Transfer*. 26: 1542-1551.
- [11] Chandra, P.R., Alexander, C.R. and Han, J.C. 2003. "Heat transfer and friction behaviour in rectangular channels with varying number of ribbed walls." *Int. J. Heat Mass Transfer*. 46: 481-495.
- [12] Lu, B. and Jiang, P.X. 2005. "Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a rectangular channel with angled ribs." *Exp. Thermal Fluid Science*. 30: 513-521.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Han, Glicksman, L.R. and Rohsenow, W.M. 1978. "An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces." *Int. J. Heat Mass Transfer*. 21: 1143–1156.
- [14] Han, J.C., Zhang, Y.M. and Lee, C.P. 1991. "Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs." *ASME J. Heat Transfer*. 113: 590–596.
- [15] Han, J.C., Huang, J.J. and Lee, C.P. 1993. "Augmented heat transfer in square channels with wedge-shaped and delta-shaped turbulence promoters." *J. Enhanced Heat Transfer*. 1: 37–52.
- [16] Taslim, M.E., Li, T. and Kercher, D.M. 1996. "Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped, and discrete ribs on two opposite walls." *ASME J. Turbomachinery*. 118: 20–28.
- [17] Rau, G., Cakan, M., Moeller, D. and Arts, T. 1998. "The effect of periodic ribs on the local aerodynamic and heat transfer performance of a straight cooling channel." *ASME J. Turbomachinery*. 120: 368–375.
- [18] Ahn, S.W. 2001. "The effects of roughness types on friction factors and heat transfer in roughened rectangular duct." *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 28: 933–942.
- [19] Murata, A., and Mochizuki, S. 2001. "Comparison between laminar and turbulent heat transfer in a stationary square duct with transverse or angled rib turbulators." *Int. J. Heat Mass Transfer*. 44: 1127–1141.
- [20] Karwa, R. 2003. "Studies of Augmented Heat Transfer and Friction in Asymmetrically Heated Rectangular Ducts with Ribs on The heated wall in Transverse, Inclined, V-Continuous and V-Discrete Pattern." *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 30: 241–250.
- [21] Tanda, G. 2004. "Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs." *Int. J. Heat Mass Transfer*. 47: 229–243.
- [22] Promvong, P. and Thianpong, C. 2008. "Thermal performance of turbulent channel flows over different shaped ribs." *Int. Commun. Heat Mass Transfer*. 35: 1327–1334.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้