

การศึกษาพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม
ที่มีการกุดขึ้นรูปครีบทวี
Thermal behaviors of turbulent flow in tube with V-shaped ribs



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม
ที่มีการกุดขึ้นรูปครีบทวี

Thermal behaviors of turbulent flow in tube with V-shaped ribs



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thermal behaviors of turbulent flow in tube
with V-shaped ribs



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมที่มีการกดขึ้นรูปครีบริบตัววี

Thermal behaviors of turbulent flow in tube with V-shaped ribs

ผู้จัดทำ

1. นางสาวธัญชนก สุธานนท์กุล รหัสประจำตัว 56010602
2. นายพิชชากร ลอระพงษ์ รหัสประจำตัว 56010847
3. นางสาวธัญญรัตน์ สุขสิน รหัสประจำตัว 56010595

 อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์
(รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมที่มีการกีดขวางรูปครีบริบตัววี

นางสาวธัญชนก	สุทธานนท์กุล	56010602
นายพิชชากร	ลอรระพงษ์	56010847
นางสาวธัญญรัตน์	สุขสิน	56010595
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงค์	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2559		

บทคัดย่อ

การศึกษาพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมที่มีการกีดขวางรูปครีบริบตัววีนี้ ได้ทำการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขสามมิติและการถ่ายเทความร้อน ในการคำนวณใช้วิธีการแบบปริมาตรสี่เหลี่ยมบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ANSYS (FLUENT) โดยศึกษาในช่วงเลขเรโนลด์ (Reynolds number, Re) 3000 – 20,000 โดยมีการกีดขวางรูปครีบริบตัววีเพื่อสร้างการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้น้ำเป็นของไหลทดสอบมีมุมปะทะการไหล (attack angle, α) เท่ากับ 30, 45, 60 องศา อัตราส่วนระยะห่างระหว่างรอยกีดขวางกับความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (pitch ratio, $PR=P/D$) เท่ากับ 0.24, 0.32, 0.40 อัตราส่วนความลึกรอยกีดขวางกับความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (blockage ratio, $BR=e/D$) เท่ากับ 0.02 ความยาวรอยกีดขวาง (length of rib, L/D) เท่ากับ 0.15, 0.20, 0.25 และจำนวนครีบริบที่กดลงบนท่อจำนวน 6, 8 และ 9 ครีบริบ การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันจะแสดงค่าในรูปของเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number, Nu) และตัวประกอบเสียดทาน (friction factor, f) รวมทั้งค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน (Thermal enhancement factor, TEF) การศึกษานี้ได้พบว่าท่อกลมที่มีการกีดขวางรูปครีบริบตัววี มีค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนมากกว่าท่อเรียบ โดยค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนของการศึกษานี้ได้ค่าอยู่ในช่วง 1.35 - 2.61 และมีค่าสูงสุด 2.61 พบที่ท่อที่มีการกีดขวางจำนวน 9 ครีบริบ มุมปะทะ 45 องศา $PR=0.24$ และ $L/D=0.25$ ที่เลขเรโนลด์ 3000

Thermal behaviors of turbulent flow in tube with V-shaped ribs

Thanyachanok	Sutthanonkul	56010602
Pitchakorn	Loraphong	56010847
Thanyarat	Sooksin	56010595
Assoc.Prof.Dr.Pongjet	Promvonge	Advisor
Year 2016		

ABSTRACT

This project presents a numerical investigation on heat transfer enhancement by commercial software, ANSYS (FLUENT) for calculating the three dimensional turbulent flow in a constant heat-fluxed tube with V-shaped ribs. The V-shaped ribs will cause counter-rotating vortices inside the tube and convey the colder fluid to the heated-wall region. The test fluid is water having the flow rate in terms of Reynolds number from 3000 to 20,000. The V-shaped ribs was tested with three attack angles, $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, three ratios of axial length between adjacent ribs to tube diameter, called pitch ratio, PR (P/D) = 0.24, 0.32, 0.40, a ratio of rib height to tube diameter called blockage ratio, BR (e/D) = 0.02 and three relative lengths of ribs, (L/D) = 0.15, 0.2, 0.25, A number of ribs pressed into the tube wall per a circumference are 6, 8 and 9 ribs. The heat transfer and pressure loss are displayed in the form of Nusselt number (Nu) and friction factor (f) while the performance indicator is defined as thermal enhancement factor (TEF). We found that the tube with V-shaped ribs provided higher TEF in a range of 1.35 to 2.61 times above the smooth tube alone. The maximum value of TEF is 2.61 found at $Re=3000$ with the number of ribs = 9, $\alpha = 45^\circ$, $PR=0.24$ and $L/D=0.25$.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษามา ณ ที่นี้อย่างสูง ในการให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ดูแลเอาใจใส่อย่างดี การอบรมสั่งสอนที่มีคุณค่าและประโยชน์แก่ผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณ ดร.สมบัติ ทำนา ผู้ให้ความรู้และความช่วยเหลือทางด้านการใช้โปรแกรมในการ วิเคราะห์ หาคำตอบของปัญหา และให้คำปรึกษาในทุกด้าน

ขอขอบพระคุณครอบครัวของคณะผู้จัดทำทุกท่าน ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในทุกด้าน

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์เพื่อการศึกษา



นางสาวธัญชนก

สุทธานนท์กุล

นายพิชชากร

ลอรระพงษ์

นางสาวธัญญรัตน์

สุขสิน

สารบัญ

หน้า

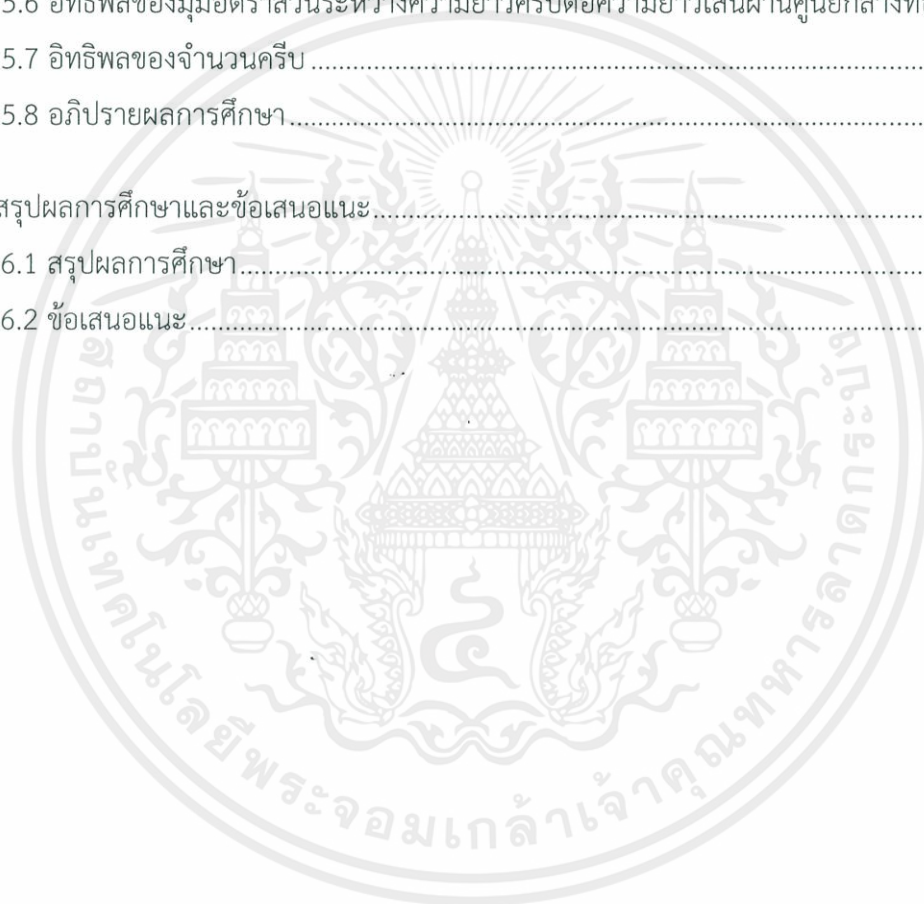
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 คำโครง.....	5
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย.....	14
บทที่ 3 สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
3.1 บทนำ.....	15
3.2 สมมุติฐานและสมการในการคำนวณ.....	15
3.3 กลศาสตร์ของของไหลเบื้องต้น.....	15
3.3.1 สภาวะการไหล.....	15
3.3.2 การไหลในท่อกลม.....	17
3.3.3 ตัวประกอบความเสียดทาน.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การพาความร้อน	19
3.4.1 ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน	19
3.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	20
3.4.3 ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน	21
3.5 สมการพื้นฐานสำหรับการไหล	22
3.5.1 กฎอนุรักษ์มวล	22
3.5.2 กฎอนุรักษ์โมเมนตัม	23
3.5.3 การไหลแบบปั่นป่วน.....	26
3.5.4 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$	28
3.6 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข	31
3.6.1 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	31
3.6.2 ชั้นก่อนประมวลผล.....	31
3.6.3 ชั้นประมวลผล.....	32
3.6.4 ชั้นแสดงผล.....	32
3.7 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	32
3.7.1 ความเข้ากันได้.....	33
3.7.2 เสถียรภาพการคำนวณ	33
3.7.3 การลู่เข้าของผลเฉลย.....	33
3.7.4 การอนุรักษ์.....	33
3.7.5 ความจำกัดขอบ	34
3.7.6 ความเสมือนจริง	34
3.7.7 ความแน่นอน.....	34
3.8 รูปแบบการจัดวางกริด.....	35
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์และขั้นตอนการศึกษา.....	37
4.1 บทนำ.....	37
4.2 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์ปัญหา.....	39
4.3 การสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม	40
4.4 การใช้คำสั่ง Fluent ในการคำนวณ.....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการศึกษาและการอภิปรายผลการศึกษา.....	51
5.1 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองตัวเลข.....	51
5.2 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม.....	53
5.3 ลักษณะพฤติกรรมของของไหลในท่อ.....	55
5.4 อิทธิพลของมุมปะทะ.....	59
5.5 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างระยะห่างครีบต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ.....	61
5.6 อิทธิพลของมุมอัตราส่วนระหว่างความยาวครีบต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ.....	63
5.7 อิทธิพลของจำนวนครีบ.....	65
5.8 อภิปรายผลการศึกษา.....	67
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	69
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	69
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	69



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	38
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับอัตราการไหลเชิงมวล	46
ตารางที่ 5.1 Grid Independent ที่ Re 8000.....	53



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบการก่ดขึ้นครีบทวีแบบแยกบนท่อกลม [3]	7
รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการก่ดขึ้นครีบทวีแบบแยกบนท่อสี่เหลี่ยม [4]	7
รูปที่ 2.3 ลักษณะการติดตั้งและขนาดของครีบทวีและครีบทวีคว่ำที่ใช้ในการทดลอง [5]	8
รูปที่ 2.4 ลักษณะการติดตั้งครีบทวีภายในห้องเผาไหม้เตาเผาฟลูอิดซ์เบด [6]	9
รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบการก่ดขึ้นครีบทวีแบบแยกบนท่อสี่เหลี่ยม [7]	9
รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบการก่ดขึ้นครีบทวีในรูปแบบต่างๆ [8]	10
รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบสามมิติของท่อกลมที่มีการก่ดขึ้นครีบทวีแบบแยก [9]	11
รูปที่ 2.8 แสดงรูปแบบการก่ดขึ้นครีบทวีบนท่อกลม [9]	11
รูปที่ 2.9 แสดงรูปการติดตั้งปีสามเหลี่ยมบนแผ่นดูดซับความร้อน [11]	12
รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบการก่ดขึ้นครีบทวีบนท่อสี่เหลี่ยม [12]	13
รูปที่ 2.11 แสดงรูปแบบการก่ดขึ้นครีบทวีเฉียงและโดเมนที่ใช้ในการคำนวณ [13]	13
รูปที่ 3.1 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลผ่านผิวของวัตถุ	16
รูปที่ 3.2 การไหลอย่างสมบูรณ์ภายในท่อกลม	17
รูปที่ 3.3 แผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์กันระหว่างค่า f และค่า Re	19
รูปที่ 3.4 ปริมาตรควบคุม	22
รูปที่ 3.5 ค่าความเร็ว u ในการไหลแบบปั่นป่วน	26
รูปที่ 3.6 ความเชื่อมโยงของกระบวนการดิสเครทไทด์และผลเฉลยประมาณค่า	32
รูปที่ 3.7 แนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ	34
รูปที่ 3.8 การจัดวางกริดแบบโครงสร้างปกติ	35
รูปที่ 3.9 การจัดวางกริดแบบไม่เป็นโครงสร้าง	35
รูปที่ 3.10 ส่วนแรเงาแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ	36
รูปที่ 4.1 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์	37
รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างการสร้างแบบจำลอง	40
รูปที่ 4.3 การตั้งค่า Fluent	41
รูปที่ 4.4 แสดงการทำกริดรูปหกเหลี่ยม	42
รูปที่ 4.5 การเปิดการคำนวณสมการพลังงาน	42
รูปที่ 4.6 การตั้งค่า Viscous Model	43
รูปที่ 4.7 การตั้งค่าคุณสมบัติของของไหล	43
รูปที่ 4.8 แสดงคุณสมบัติวัสดุท่อ	44
รูปที่ 4.9 การตั้งค่า Operating Conditions	45

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 การปรับค่าผนัง	45
รูปที่ 4.11 การปรับค่าครีบ	45
รูปที่ 4.12 การปรับค่า Periodic Condition ที่เลขเรย์โนลด์ 3000	46
รูปที่ 4.13 กำหนดค่าใน Reference values	47
รูปที่ 4.14 การตั้งค่า Solution Methods	48
รูปที่ 4.15 แสดงการปรับค่า Solution Controls	48
รูปที่ 4.16 แสดงการกำหนดค่าใน Monitors.....	48
รูปที่ 4.17 การกำหนดค่าเริ่มต้น	49
รูปที่ 4.18 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิ.....	49
รูปที่ 4.19 แสดงผลการคำนวณ Nusselt	50
รูปที่ 5.1 ภาพแสดงโดเมนในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของ Xiao-wei Li, Ji-an Meng , Zeng-yuan Guo [1]	51
รูปที่ 5.2 ภาพแสดงโมเดลในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของ Xiao-wei Li, Ji-an Meng , Zeng-yuan Guo [1]	51
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับเลขนัสเซลท์จากแบบจำลอง RNG k- ϵ และผลการทดลองของ X.W.Li,J.A. Meng และZ.Y. Guo [1]	52
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับตัวประกอบความเสียดทานจากแบบจำลอง RNG k- ϵ และผลการทดลองของ X.W .Li,J.A. Meng และZ.Y. Guo [1]	52
รูปที่ 5.5 ภาพแสดงลักษณะของกริดในโดเมนที่ใช้ในการศึกษาเชิงตัวเลข.....	53
รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะท่อและครีบการกด	54
รูปที่ 5.7 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า Nu ที่ Re=8,000	54
รูปที่ 5.8 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า f ที่ Re=8,000	55
รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อที่ทางเข้า, บริเวณกลางท่อของโดเมนและ ทางออก ตามลำดับ	55
รูปที่ 5.10 แสดงแผนภาพอุณหภูมิของท่อเรียบและท่อที่มีการกดขึ้นครีบตัววี	56
รูปที่ 5.11 แสดงกระแสการไหลภายในท่อที่มีการกดขึ้นครีบตัววี	57
รูปที่ 5.12 แผนภาพแสดงค่า นัสเซลท์บนผนังท่อของท่อเรียบและท่อที่มีการกดครีบรูปตัววี จำนวน 9 คู่	58
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์กับเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพลมุมปะทะ...59	59

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทาน ในการแสดงอิทธิพลมุมปะทะ	59
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพลมุมปะทะ	60
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัลเซลล์ในการแสดงอิทธิพล PR	61
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทาน ในการแสดงอิทธิพล PR.....	61
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพล PR.....	62
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัลเซลล์ในการแสดงอิทธิพลของ L/D ...	63
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทาน ในการแสดงอิทธิพลของ L/D	63
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพลของ L/D	64
รูปที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัลเซลล์ ในการแสดงอิทธิพลของจำนวนครีป	65
รูปที่ 5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทาน ในการแสดงอิทธิพลของจำนวนครีป	65
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพลของจำนวนครีป	66
รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัลเซลล์ในการอภิปรายผลการศึกษา....	67
รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทาน ในการอภิปรายผลการศึกษา.....	67
รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการอภิปรายผลการศึกษา.....	68

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_c	พื้นที่หน้าตัด , m^2
A_s	พื้นที่ผิว , m^2
C_f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
C_p	ความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่ , $J/kg \cdot K$
C_V	ความร้อนจำเพาะของของไหลที่ปริมาตรคงที่ , $J/kg \cdot K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ , m
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก(Hydraulic diameter) , m
f	ตัวประกอบแรงเสียดทาน
f_0	ตัวประกอบแรงเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน , $W/m^2 \cdot K$
k	ค่าการนำความร้อน , $W/m^2 \cdot K$
L	ความยาวท่อ , m
\dot{m}	อัตราการไหลของของไหล , kg/s
Nu_D	นัสเซิลท์นัมเบอร์
Nu_o	นัสเซิลท์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบ
Pr	พลาหนท์นัมเบอร์
p	ระยะพิตต์
Δp	ความดันลดของของไหล , N/m^2
Q	อัตราการไหลของของไหล , m^3/s
q_{conv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด , W
q''_s	ฟลักซ์ความร้อนที่ผิว , W/m^2
R	ค่าคงที่ของก๊าซ , $J/kg \cdot K$
Re_D	เรย์โนลด์นัมเบอร์
r_0	รัศมีมีท่อกลม , m
T	อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ , $^{\circ}C$
T_b	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล , $^{\circ}C$
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ , $^{\circ}C$
$T_{m,j}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อทางเข้า , $^{\circ}C$

$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อทางออก , °C
T_s	อุณหภูมิเฉลี่ยผิวครีบ , °C
u	ความเร็วตามแนวแกน x , m/s
u_m	ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ , m/s
\bar{V}	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล , m/s
v	ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน , m/s
ρ	ความหนาแน่นของของไหล , kg/m^3
μ	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล , $N \cdot s/m^2$
μ_s	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหลที่ผิว , $N \cdot s/m^2$
ν	ประมาณจำเพาะ , m^2/s
τ_r	ความเค้นเฉือนในแนวรัศมี , N/m^2
τ_s	ความเค้นเฉือนบนผิว , N/m^2



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ อุปกรณ์สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนจากของไหลหนึ่ง ไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่งโดยที่ของไหลสัมผัสหรือผสมกันหรือไม่ก็ได้ ซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีหลากหลายชนิด ถ้าจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยทิศทางการไหลของของไหล จะพบว่าแบ่งได้เป็น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่ของไหลมีทิศการไหลตั้งฉากกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น เป็นต้น

ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อน ส่วนใหญ่จะมีการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเช่น อุตสาหกรรมน้ำมัน ที่ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบให้ร้อนขึ้นหรือในการลดอุณหภูมิของก๊าซหรือน้ำมัน และทำให้สภาวะไอที่ออกมาจากหอกลั่นให้กลายเป็นของเหลว หรือในอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง อุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่างมีการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิ ลดอุณหภูมิ หรือนำความร้อนจากของไหลมาหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่เป็นต้น และยังมีตัวอย่างสิ่งของใกล้ตัวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เห็นได้ในชีวิตประจำวัน เช่น เครื่องยนต์ หม้อไอน้ำ เครื่องทำความเย็น เครื่องควบแน่น คอยล์ร้อน คอยล์เย็น เครื่องกลั่น เป็นต้น

จากที่กล่าวในข้างต้น จะพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญและใช้อย่างแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม ถ้าสามารถทำการปรับปรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพให้ดีขึ้น จะสามารถประหยัดพลังงานและลดต้นทุนให้กับโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ จึงนับได้ว่าเป็นประโยชน์และมีคุณค่าแก่งานวิจัยที่จะเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการเพิ่มประสิทธิภาพหรือการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนนั้น สามารถทำได้โดย 2 วิธีหลัก คือ วิธีที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก (Passive technique) เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนหรือสร้างการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ และวิธีที่ต้องการพลังงานจากภายนอก (Active technique) เป็นการใช้อุปกรณ์ภายนอกทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของของไหลภายในท่อ ซึ่งวิธีที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกนั้น จะเป็นนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการปรับปรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพราะต้นทุนการผลิตต่ำและสามารถปรับปรุงพัฒนาได้หลายรูปแบบโดยเทคนิคหนึ่งวิธีที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกที่นักวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้นั้น คือ การทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้น โดยการคร่อมขัดขวางการไหลทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน แต่ก็จะทำให้เกิดความดันตกคร่อมในท่อมากขึ้น ดังนั้นการเลือกใช้ตัวสร้างการปั่นป่วนหรือในเลือกรูปแบบลักษณะใน

การก่อดร้งขัดขวางการไหลในการศึกษาครั้งนี้จึงต้องมีความเหมาะสม เพื่อให้นำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เกิดประโยชน์สูงสุด มีความคุ้มค่าในการลงทุนและประโยชน์ในทางด้านเศรษฐศาสตร์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาพฤติกรรมการความร้อนของการไหลที่มีลักษณะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติ และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการก่อดร้งรูปตัววีซึ่งใช้น้ำเป็นของไหลทดสอบ กำหนดผนังท่อมีความร้อนแบบฟังก์ชันความร้อนที่ใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ANSYS ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและมีความน่าเชื่อถือวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ประกอบด้วย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิเคราะห์เชิงตัวเลขของท่อกลมที่มีการก่อดร้งรูปครีบริบตัววี

1.2.2 เพื่อศึกษาและออกแบบเพื่อเพิ่มค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในท่อกลมที่มีการก่อดร้งรูปครีบริบตัววี

1.2.3 เพื่อศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ ได้แก่ มุมปะทะ อัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีบริบต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และอัตราส่วนระหว่างความยาวของครีบริบต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

1.2.4 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหล การถ่ายเทความร้อน ความดันตกคร่อม และค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในท่อกลมที่มีการก่อดร้งรูปครีบริบตัววีเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การก่อดร้งขัดขวางการไหลโดยการก่อดร้งรูปครีบริบตัววีในท่อกลมจะสร้างความปั่นป่วนในการไหลภายในท่อกลม และสามารถเพิ่มค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปANSYSบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) และการให้ความร้อนที่ผิวเป็นแบบอนุกรมกึ่งที่ 310 องศาเซลเซียส

1.4.2 จำลองโดยใช้น้ำเป็นของไหลทดสอบซึ่งคุณสมบัติของของไหลมีค่าคงที่และไม่พิจารณาแรงวิฤต

1.4.3 ศึกษาในช่วงเลขเรโนลด์ 3,000 ถึง 20,000 ซึ่งเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

1.4.4 ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG k- ϵ

1.4.5 ลักษณะของครีบบีมุมปะทะ 30°, 45°, 60°

1.4.6 ลักษณะของครีบบี้อัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีบท่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 0.24, 0.32, 0.40

1.4.7 ลักษณะของครีบบี้อัตราส่วนระหว่างความยาวของครีบท่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 0.15, 0.20, 0.25

1.4.8 หารูปแบบการก่อกวนครีบบี้อัตราส่วนที่เหมาะสม ทั้งขนาดรูปร่าง มุมปะทะ อัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีบท่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และอัตราส่วนระหว่างความยาวของครีบท่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เพื่อเปรียบเทียบค่าการเพิ่มของค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1.5.1 ศึกษาทฤษฎี รวบรวมข้อมูล และงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ที่มีความเกี่ยวข้องกับการเพิ่มค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนโดยการกีดกันครีบบนท่อ

1.5.2 กำหนดลักษณะรูปร่างของการกีดกันครีบบนท่อและสร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลซึ่งเป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

1.5.3 ตรวจสอบความถูกต้องและการตั้งค่าแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหล โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองของงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตกับผลลัพธ์ที่ได้จากใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ANSYS

1.5.4 ออกแบบลักษณะการกีดกันครีบบนท่อที่จะใช้จากการประยุกต์จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา รวมทั้งตรวจสอบหาขนาดและจำนวนกริดที่เหมาะสม

1.5.5 ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ มุมปะทะ อัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีบบนท่อ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และอัตราส่วนระหว่างความยาวของครีบบนท่อ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

1.5.6 วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข และรับคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษาในการปรับปรุงแก้ไข

1.5.7 สรุปผลการศึกษา

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ความรู้เกี่ยวกับการเพิ่มค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนแบบวิธีที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก (Passive technique) เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนหรือสร้างการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ

1.6.2 ทราบถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนที่มีการกีดกันครีบบนท่อ

1.6.3 มีความเข้าใจในพฤติกรรมการไหล การถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม ตัวประกอบเสียดทาน และค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในท่อที่มีการกีดกันครีบบนท่อ

1.6.4 ได้ค่าที่เหมาะสมหรือค่าที่ดีที่สุดในการออกแบบการกีดกันครีบบนท่อกลมที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาและออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

1.7 เค้าโครง

นำเสนอนื้อหาอกเป็น 6 บท โดยแต่ละบทประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวนำในความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาของการทำวิทยานิพนธ์ ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

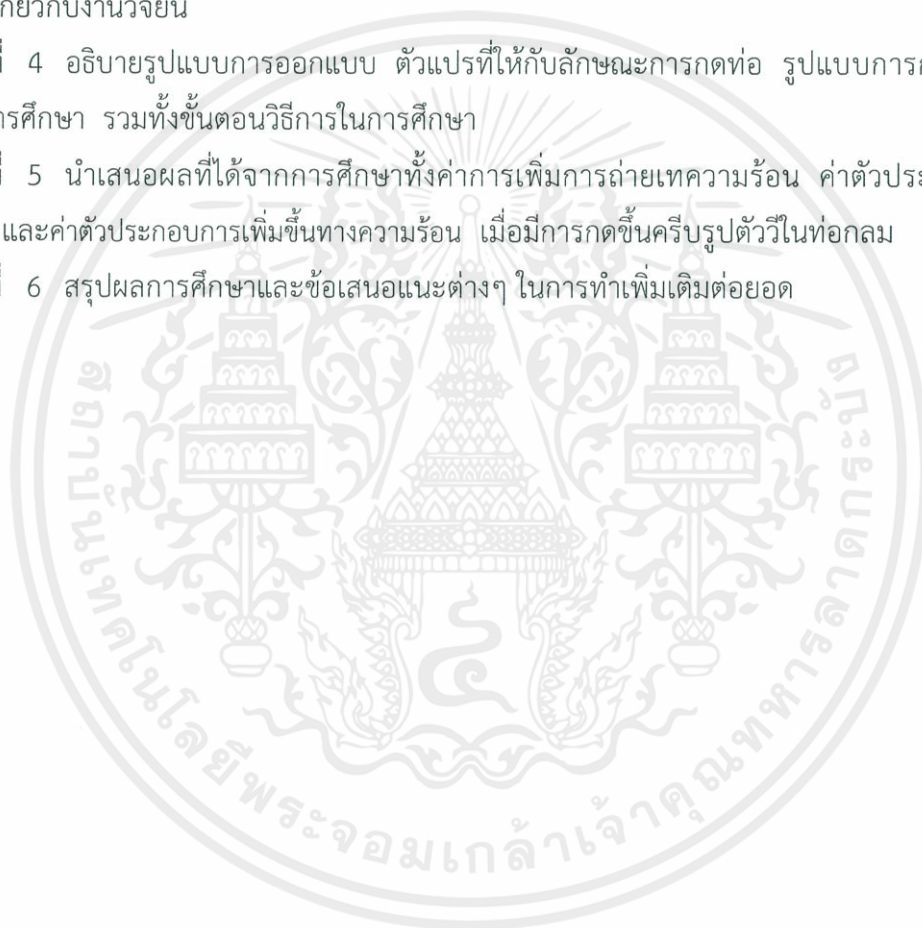
บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาที่มีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมความร้อนของท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการกดขึ้นครีบในรูปแบบต่างๆ

บทที่ 3 กล่าวเกี่ยวกับสมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและเข้าใจเกี่ยวกับงานวิจัยนี้

บทที่ 4 อธิบายรูปแบบการออกแบบ ตัวแปรที่ให้กับลักษณะการกดท่อ รูปแบบการกดขึ้นครีบที่ทำการศึกษา รวมทั้งขั้นตอนวิธีการในการศึกษา

บทที่ 5 นำเสนอผลที่ได้จากการศึกษาหึ่งค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน เมื่อมีการกดขึ้นครีบรูปตัววีในท่อกลม

บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ ในการทำเพิ่มเติมต่อยอด



บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีการจำลองท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในหลายรูปแบบ ซึ่งมีการศึกษาทั้งการทำการทดลอง การทดลองเชิงตัวเลข หรือใช้ทั้งสองวิธีวิเคราะห์ร่วมกัน โดยเน้นงานวิจัยที่ได้ศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อที่มีการก่อกวนขึ้นครีบ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบและตัวสร้างกระแสนวน [1]

ในปีพุทธศักราช 2550 ณรงค์ ทรัพย์พุทธิวิงษ์ นำเสนองานวิจัยการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบและตัวสร้างกระแสนวน โดยใช้ลมเป็นของไหลทดสอบในช่วงค่าเรโนลด์ 3,000 ถึง 20,000 เปรียบเทียบผลของท่อที่มีครีบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก และท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่ผิวบนและผิวล่างท่อ กับท่อที่มีผนังเรียบ โดยให้ลมไหลแบบตรง ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง โดยให้ลมไหลแบบตรงและลมไหลแบบหมุนวน เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทาน พบว่าชุดทดลองที่มีครีบและกระแสนวนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานมากขึ้น และพบว่าท่อที่มีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วให้ผลการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

2.2.2 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องแผ่นขนานโดยใช้ครีบรูปตัววี [2]

ในปีพุทธศักราช 2551 สมพล สกุหลอง นำเสนองานวิจัยการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยช่องขนานที่มีครีบสามเหลี่ยมและครีบบาง โดยทำการทดลองที่สภาวะการถ่ายเทความร้อนที่ผิวแบบคงที่ในช่วงเลขเรโนลด์ 5,000 ถึง 25,000 และทำการเปรียบเทียบผลของช่องขนานที่มีผนังเรียบ จากการทดลองพบว่าชุดทดลองที่มีครีบบางทำมุม 60 องศา ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น โดยค่า $PR = 1$ และ $e/H = 0.3$ ให้ผลการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

2.2.3 Turbulent flow and heat transfer in discrete double inclined ribs tube [3]

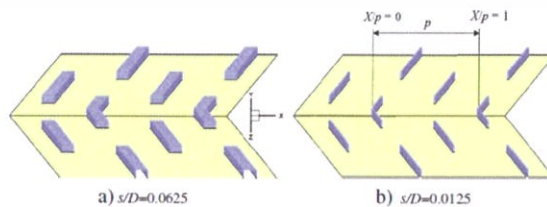
ในปีพุทธศักราช 2552 Li et al. ศึกษาทั้งการทำการทดลองจริงและศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายโอนความร้อนแบบปั่นป่วนและเพิ่มความต้านทานการไหลของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ ด้วยค่าเลขเรโนลด์ระหว่าง 15,000 ถึง 60,000 และใช้น้ำเป็นของไหลที่ไหลในท่อ ทำการทดลองเชิงตัวเลขสามมิติเพื่อหาค่าเลขนัลเชิลท์เฉลี่ย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทำการทดลองจริง โดยมีค่าแตกต่างกันมากที่สุดที่ร้อยละสิบสำหรับเลขนัลเชิลท์ และร้อยละสิบห้าสำหรับตัวประกอบเสียดทานการถ่ายเทความร้อนในท่อ DDIR ตีกว่าร้อยละหนึ่งร้อยถึงร้อยละหนึ่งร้อยยี่สิบเมื่อเทียบกับท่อเรียบ และความดันลดเพิ่มขึ้นร้อยละหนึ่งร้อยเจ็ดสิบถึงร้อยละสองร้อยห้าสิบ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่กำลังปั๊มเดียวกันจะตีกว่าร้อยละสามสิบถึงร้อยละห้าสิบ จากที่กล่าวมาจึงจะเห็นได้ว่าการเพิ่มครีบนั้นทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบการก่ดขึ้นครีบบตัววีแบบแยกบนท่อกลม [3]

2.2.4 Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline V-shaped discrete ribs [4]

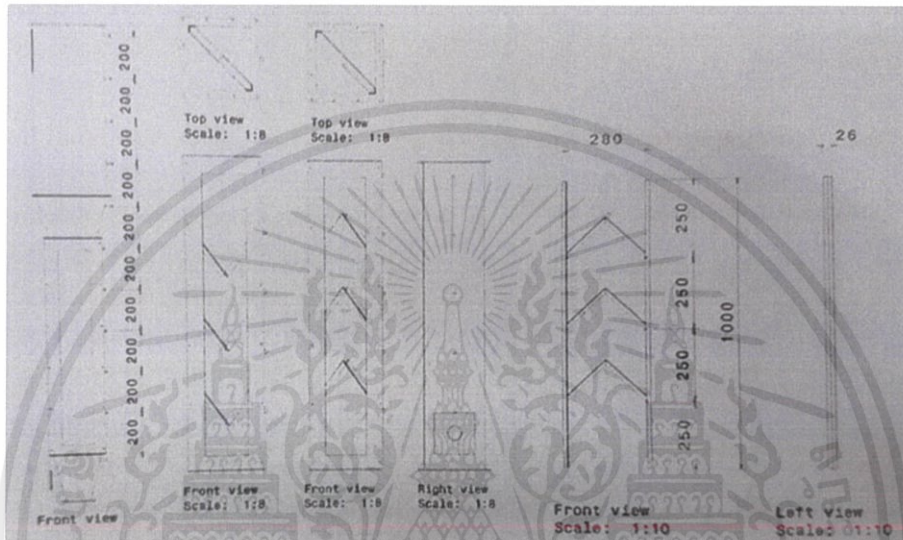
ในปีพุทธศักราช 2554 Promvong et al. ทำการศึกษาเชิงตัวเลขในการไหลปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบบตัววีมุม 60° แบบแยกวางบนผนังสองด้านตรงข้ามกัน โดยศึกษาในช่วงเลขเรโนลด์ 10,000 ถึง 25,000 จะพบว่าท่อที่มีครีบบตัววีนี้ทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นกว่าท่อเรียบ การเพิ่มอัตราส่วนการบล็อกการไหล (Blockage ratio, BR) จะเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานด้วย และจะพบว่าที่อัตราส่วนการบล็อกการไหล 0.0725 จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อน 4 เท่าของท่อเรียบที่เลขเรโนลด์ต่ำ และจะมีค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนประมาณ 1.8



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการก่ดขึ้นครีบบตัววีแบบแยกบนท่อสี่เหลี่ยม [4]

2.2.5 อิทธิพลของครีบริบตัววีในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดต่อการเผาไหม้แกลบ [5]

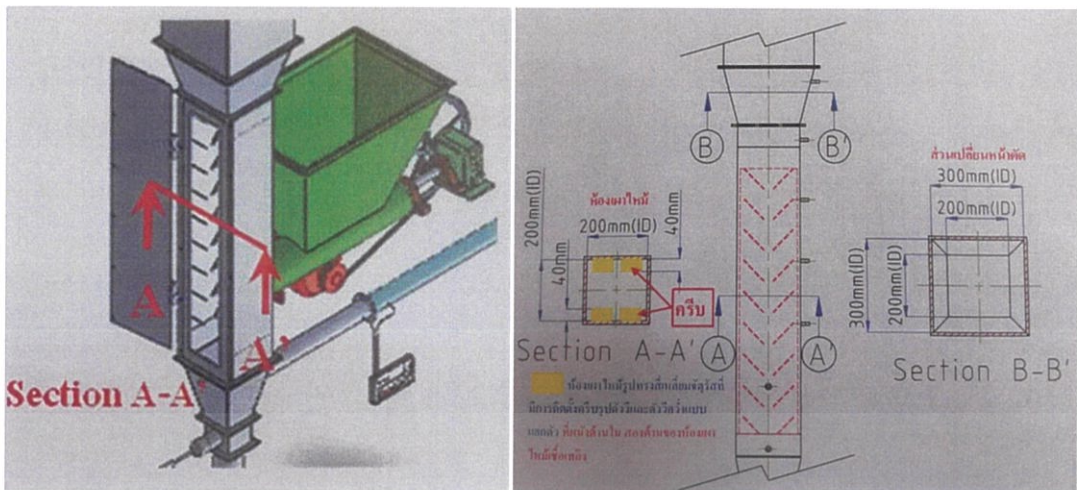
ในปีศพุทธศักราช 2554 ณัฐวัฒน์ ชั่งชัย นำเสนอการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทำการติดครีบริบสามเหลี่ยมตัววีขวางแนวทแยงมุมพื้นที่ครึ่งบนของห้องเผาไหม้ ลักษณะครีบริบที่ติดตั้งเป็นครีบริบที่มีมุม 30° , 45° และ 60° โดยแต่ละมุมปรับเปลี่ยนจำนวนครีบริบเป็น 2, 3 และ 4 ครีบริบ พบว่าครีบริบมุม 45° จำนวน 3 ครีบริบ ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการศึกษาวิจัย



รูปที่ 2.3 ลักษณะการติดตั้งและขนาดของครีบริบตัววีและครีบริบตัววีคว่ำที่ใช้ในการทดลอง [5]

2.2.6 พฤติกรรมการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดที่มีครีบริบตัววีแยกตัว [6]

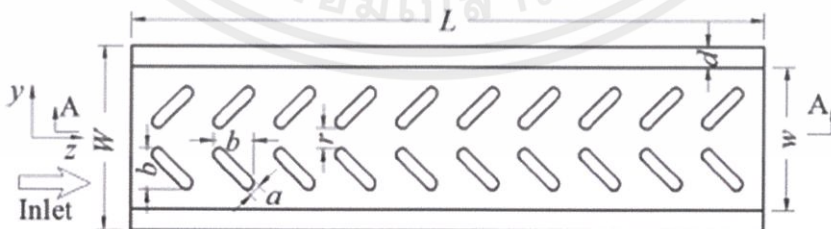
ในปีพุทธศักราช 2556 ภัทรพันธุ์ ทองยศ นำเสนอถึงผลการกระจายอุณหภูมิและลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบภายในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทำการปรับเปลี่ยนลักษณะห้องเผาไหม้หลากหลายรูปแบบ ห้องเผาไหม้ที่ไม่มีการติดตั้งครีบริบ ห้องเผาไหม้ที่มีการติดตั้งครีบริบตัววีคว่ำแบบแยกตัวมีมุมปะทะการไหล 30° , 45° , และ 60° และระยะห่างของครีบริบ $0.5H$, $1.0H$ และ $1.5H$ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ 4.6, 5.1 และ 5.9 กิโลกรัม/ชั่วโมง และปริมาณการไหลของอากาศ 44.3, 51.6 และ 59.8 กิโลกรัม/ชั่วโมง พบว่าห้องเผาไหม้ที่มีการติดตั้งครีบริบให้ผลอุณหภูมิที่สูงและเสถียรกว่ากรณีไม่ติดตั้งครีบริบ โดยกรณีการติดตั้งครีบริบตัววีแยกตัวมุมปะทะ 45° ให้ค่าอุณหภูมิและประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุด



รูปที่ 2.4 ลักษณะการติดตั้งครีบบนภายในห้องเผาไหม้เตาเผาฟลูอิดซ์เบด [6]

2.2.7 Numerical study and performance analyses of the mini-channel with discrete double-inclined [7]

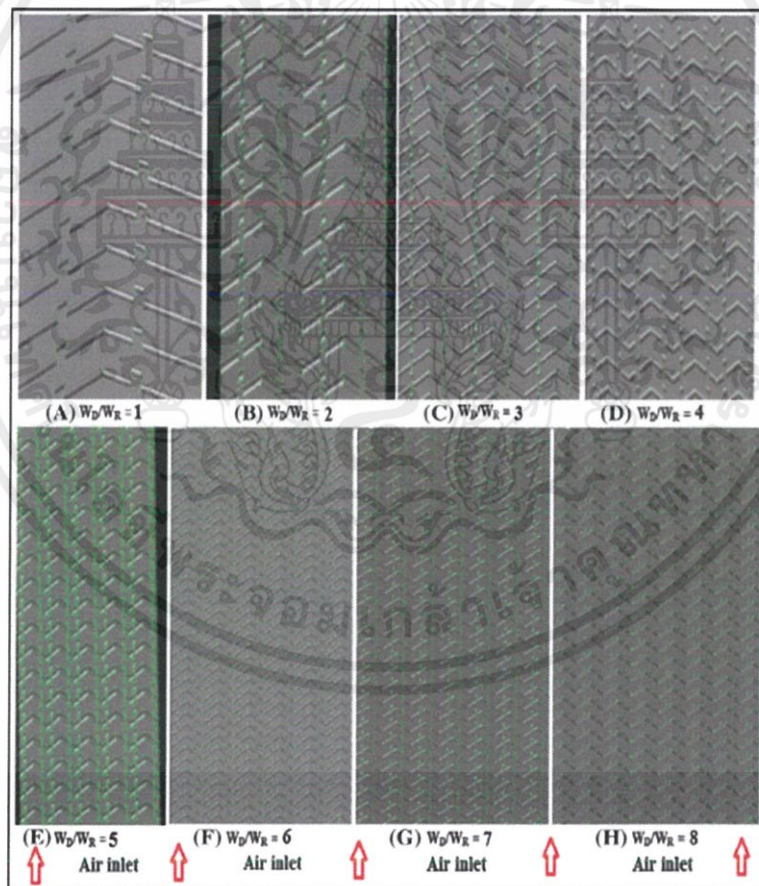
ในปีพุทธศักราช 2557 Wang et al. นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขในสามมิติของพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบราบเรียบและค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในท่อที่มีการก่อกวนครีบบนในมินิชาแนล ซึ่งการก่อกวนครีบบนนี้จะทำให้เกิดกระแสไหลวนตามยาว อิทธิพลของเลขเรโนลด์ ความสูงของครีบบนและจำนวนของครีบบนต่อความยาว และพบว่าค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนจะดีขึ้นเมื่อเกิดกระแสไหลวนตามยาวและการเพิ่มความสูงของครีบบนหรือจำนวนของครีบบนก็ส่งผลให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนดีขึ้น แต่จะเกิดความต้านทานการไหลหรือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เพื่อที่จะหารูปแบบที่เหมาะสมและทำให้ได้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนที่ดีที่สุดพบว่าความสูงของครีบบนควรที่จะลดลงเมื่อเพิ่มเลขเรโนลด์ ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนจะถูกปรับปรุงให้เพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนของครีบบนมากขึ้น



รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบการก่อกวนครีบบนแบบแยกบนท่อสี่เหลี่ยม [7]

2.2.8 Effect of roughness width ratios in discrete multi V-rib with staggered rib roughness on overall thermal performance of solar air channel [8]

ในปีพุทธศักราช 2558 Kumar และ Kim แสดงผลลัพธ์ของการคำนวณ computational fluid dynamics (CFD) ของลักษณะการไหลของของเหลวในท่อลมร้อน (solar air channel) ที่มีครีบริบรูปตัว V หลายอันแบบไม่ต่อเนื่องที่มีครีบริบกันโดยประกอบด้วย 4 รูปแบบของการไหลแบบปั่นป่วนที่แตกต่างกัน คือ RNGk- ϵ model, realizable k- ϵ model, standard k- ϵ model และ SST k- ω model ที่ถูกทดสอบสำหรับท่อเรียบโดย RNG k- ϵ model ถูกเลือกให้เป็นวิธีที่ดีที่สุด โดยมีผลกระทบกับอัตราส่วนความสัมพันธ์ความกว้างของครีบริบตัว V หลายอันแบบไม่ต่อเนื่องที่มีครีบริบกันบนค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่าเฉลี่ยตัวประกอบแรงเสียดทานและค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนที่ถูกศึกษา ค่าเฉลี่ยเลขคณิตที่มีค่าสูงสุดที่มีอัตราความสัมพันธ์ความกว้างเท่ากับ 6.0 และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.0 ในการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนโดยรวมของครีบริบตัว V หลายอันแบบไม่ต่อเนื่องที่มีครีบริบกันเท่ากับ 6 % ซึ่งสูงกว่ารูปร่างแบบอื่น



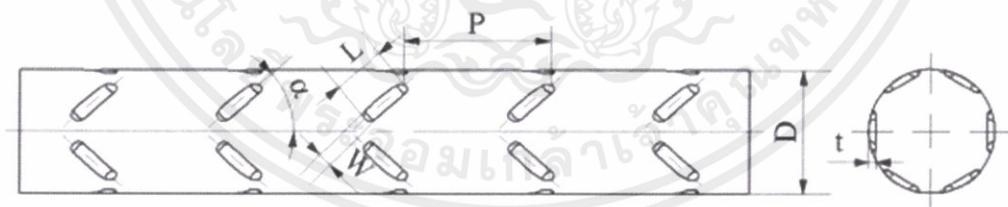
รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบการกีดขวางครีบริบตัววีในรูปแบบต่างๆ [8]

2.2.9 A numerical study on heat transfer enhancement and the flow structure in a heat exchanger tube with discrete double inclined ribs [9]

ในปีพุทธศักราช 2558 Zheng et al. ได้นำเสนอผลการศึกษาค่าตัวเลขเชิงตัวเลขในรูปของค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนและพฤติกรรมการไหลในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการกดขึ้นครีบริบรูปตัววีแบบแยก โดยใช้ น้ำ เป็นของไหลทดสอบ ทดสอบในช่วงเลขเรโนลด์ 3390 ถึง 20340 ผลการของศึกษาพบว่าท่อที่มีการกดขึ้นครีบริบตัววีแบบแยกมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าท่อเรียบประมาณ 1.8 - 3.6 เท่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากกว่าประมาณ 2.1 - 5.6 เท่า ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนที่ทำโดยพื้นฐานกำลังบีมเท่ากันพบว่ามีค่าในช่วง 1.3 - 2.3 และพบว่าพฤติกรรมการไหลของการกดขึ้นครีบริบวีแบบแยกจำนวน 3 คู่เป็นแบบการไหลแบบปั่นป่วนและเกิดกระแสไหลวนก่อกเกิดการผสมของของไหลบริเวณใกล้ผนังกับบริเวณแกนกลางของกระแสไหลวนภายในท่อซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดี และค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ศึกษาได้ในการกดขึ้นครีบริบคือ ความยาวครีบริบ 4 มิลลิเมตร อัตราส่วนพิท 5 และมุมปะทะ 37.5



รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบสามมิติของท่อกลมที่มีการกดขึ้นครีบริบแบบแยกตัว [9]



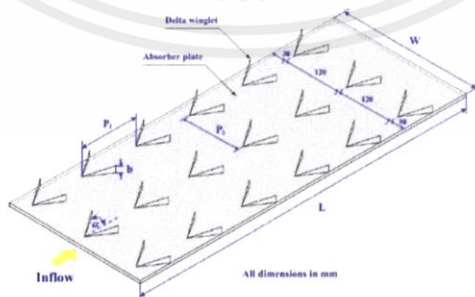
รูปที่ 2.8 แสดงรูปแบบการกดขึ้นครีบริบตัววีบนท่อกลม [9]

2.2.10 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนช่องขนานโดยใช้แผ่นกั้นรูปตัววี [10]

ในปีพุทธศักราช 2558 ประวัตี สุดแก้ว นำเสนอการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นขนานด้วยการติดครีบริบตัววีขวางทิศทางการไหลตลอดแนวยาว ในช่วงทดสอบที่ช่วงเลขเรโนลด์ 4,100 ถึง 22,000 ที่แผ่นด้านบนของช่องขนานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนโดยแสดงในเทอมของเลขนัสเซลท์ และการสูญเสียความดันในเทอมตัวประกอบเสียดทาน มีการทดลองเป็นรูปแบบของตัววีหลายกรณี ที่การติดครีบริบตัววีที่มุมปะทะ 30° , $PR=0.5$ และ $e/H=0.05$ โดยวางครีบริบที่ผิวบนด้านเดียว พบว่าให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.98 ที่เลขเรโนลด์ต่ำสุด

2.2.11 การศึกษาเชิงทดลองของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่ออุณหอากาศพลังแสงอาทิตย์ด้วยตัวสร้างการไหลหมุนควงตามแนวยาว [11]

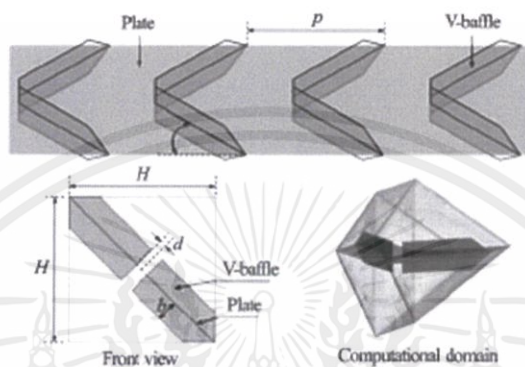
ในปีพุทธศักราช 2559 ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ และคณะ นำเสนอผลการทดลองของการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการไหลในท่ออุณหอากาศพลังแสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งปีกสามเหลี่ยมบนแผ่นดูดซับความร้อนเพื่อสร้างการไหลหมุนควงการทดสอบดำเนินการในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีสัดส่วนความกว้างต่อความสูงท่อ, $W/H=AR=10$ อัตราการไหลของอากาศแสดงในรูปของเลขเรย์โนลด์ในช่วง 5300 ถึง 23,000 ปีกสามเหลี่ยมมุม 30° มีสัดส่วนระยะพิตซ์ตามแนวการไหลต่อความสูงท่อ (PV/H) เท่ากับ 2 สัดส่วนระยะพิตซ์ตามแนวขวางการไหลต่อความสูงท่อ (PT/H) เท่ากับ 4 และสัดส่วนความสูงปีกต่อความสูงท่อ (b/H) 3ค่าคือ 0.3, 0.4 และ 0.5 โดยทำการติดตั้งที่ผิวด้านบนของส่วนทดสอบซึ่งจำลองเป็นแผ่นดูดซับความร้อนเพื่อสร้างการไหลหมุนควงตามแนวยาวผลการทดลองพบว่าการติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนควงชนิดปีกให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียมากกว่าท่อแผ่นเรียบการติดตั้งปีกที่มีค่า b/H สูงให้ค่าเลขนัสเซลท์ (Nu) และตัวประกอบเสียดทาน (f) สูงกว่าการติดตั้งปีกที่มีค่า b/H ต่ำ อย่างไรก็ตามค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดกลับพบที่ $b/H=0.4$ เนื่องจากการสูญเสียความดันในระดับปานกลาง



รูปที่ 2.9 แสดงรูปการติดตั้งปีกสามเหลี่ยมบนแผ่นดูดซับความร้อน [11]

2.2.12 Turbulent heat transfer and pressure loss in a square channel with discrete broken V-rib turbulators [12]

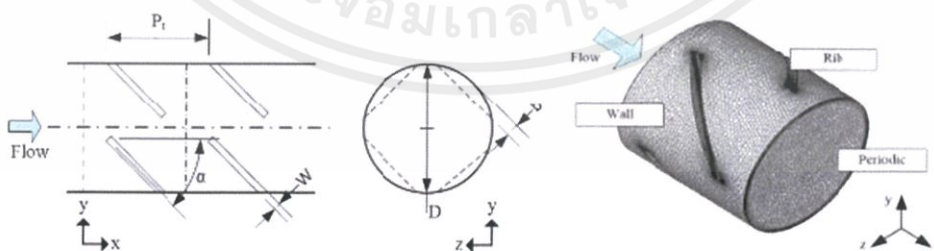
ในปีพุทธศักราช 2559 Promthaisong et al. นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขในการไหลปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบทัววีแบบไม่ต่อเนื่อง (B-VR) ท่อติดตั้งบนผนังสองด้านของท่อสี่เหลี่ยมเพื่อเป็นการสร้างการไหลแบบปั่นป่วนจะพบว่าการติดตั้งครีบทัววีนี้ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น และจะสังเกตเห็นได้ว่าการเพิ่มเลขเรโนลด์จะทำให้เลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบการกีดขวางครีบทัววีบนท่อสี่เหลี่ยม [12]

2.2.13 Numerical Investigation on Heat Transfer and Turbulent Flow in an Oblique-Ribbed Tube [13]

ในปีพุทธศักราช 2559 Noothong et al. นำเสนอศึกษาพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมที่มีการกีดขวางแบบเฉียง 45° โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมและ SIMPLE ในกระบวนการควบคุมของความเร็วและความดัน และเก็บค่าความดันลดและค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ผลปรากฏว่าค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนสูงสุด 1.91 ที่ความสูงครีบทัววี $b/D=0.15$ และที่เลขเรโนลด์ 5,000



รูปที่ 2.11 แสดงรูปแบบการกีดขวางครีบทัววีเฉียงและโดเมนที่ใช้ในการคำนวณ [13]

2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตสามารถสรุปได้ว่าการกดขึ้นครีบบนสามารถสร้างความปั่นป่วนในการไหลได้ ทั้งยังส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ท่อกลมที่มีการกดขึ้นครีบบนยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นสูงอย่างมาก ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนที่ได้จึงไม่สูงนัก ซึ่งเป็นเหตุผลในงานวิจัยนี้ เพื่อปรับปรุงและหารูปแบบที่เหมาะสมของครีบบนสำหรับการกดขึ้นครีบบนต่อท่อกลม

ในการทดลองเชิงตัวเลขนี้ คณะผู้ศึกษาทำการปรับปรุงรูปแบบการกดขึ้นครีบบนรูปตัววี โดยปรับมุมปะทะ อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีบบนต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (PR) อัตราส่วนระหว่างความยาวของครีบบนต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (L/D) ในค่าต่างๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมและได้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนที่สูงที่สุด



สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวเกี่ยวกับสมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงาน โดยพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม การไหลในท่อกลม ค่าความดันตกคร่อม ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน กลศาสตร์ของของไหลเบื้องต้น การพาความร้อน สมการพื้นฐานและแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับใช้กันมากในปัจจุบัน

3.2 สมมติฐานและสมการในการคำนวณ

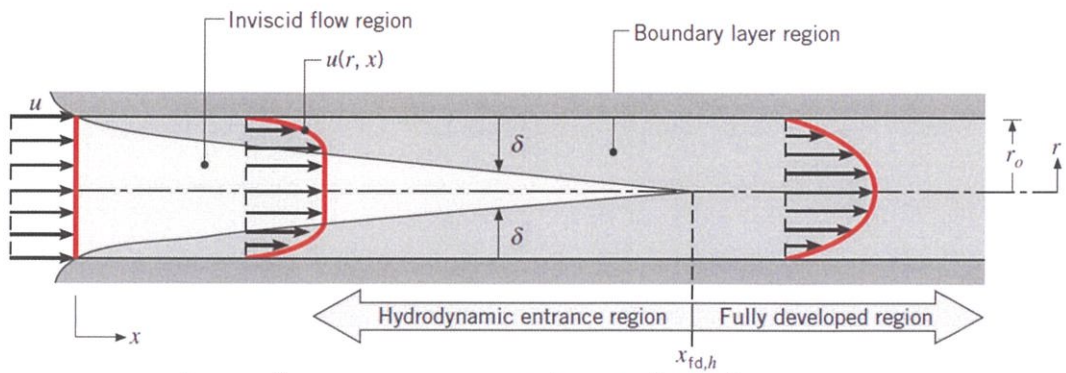
การศึกษาใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และมีการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยมีสมมติฐานในการศึกษาดังนี้

- (1) ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ
- (2) เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้
- (3) แบบจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- (4) เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์และชั่วเป็นช่วง
- (5) คุณสมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่
- (6) ไม่คำนึงแรงวัตถุและการสูญเสียเนื่องจากความหนืด
- (7) ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน
- (8) ให้ความร้อนแบบอุณหภูมิคงที่ที่ผนังท่อ

3.3 กลศาสตร์ของของไหลเบื้องต้น

3.3.1 สภาวะการไหล

พิจารณาการไหลแบบราบเรียบในท่อกลมที่มีรัศมีคือ r_0 ดังรูปที่ 3.1 เมื่อของไหลไหลเข้าสู่ท่อกลมด้วยความเร็วในรูปแบบที่เหมือนกันตลอดหน้าตัดขวางการไหล จะเกิดความหนืดระหว่างของไหลที่สัมผัสกับผิวของท่อ และขอบเขตของการไหลจะปรับเปลี่ยนไปตามระยะ x ที่เพิ่มขึ้น การปรับเปลี่ยนนี้เกิดขึ้นจากพื้นที่การไหลที่มีความหนืดได้ลดน้อยลง และรวมเข้ากับเส้นศูนย์กลางในที่สุด ดังรูปที่ 3.1 และจากการรวมเข้ากันกับเส้นศูนย์กลางนี้ทำให้ผลกระทบจากความหนืดและรูปแบบของความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะ x หรือสามารถตัดผลกระทบจากความหนืดทิ้งไปได้



รูปที่ 3.1 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลผ่านผิวของวัตถุ

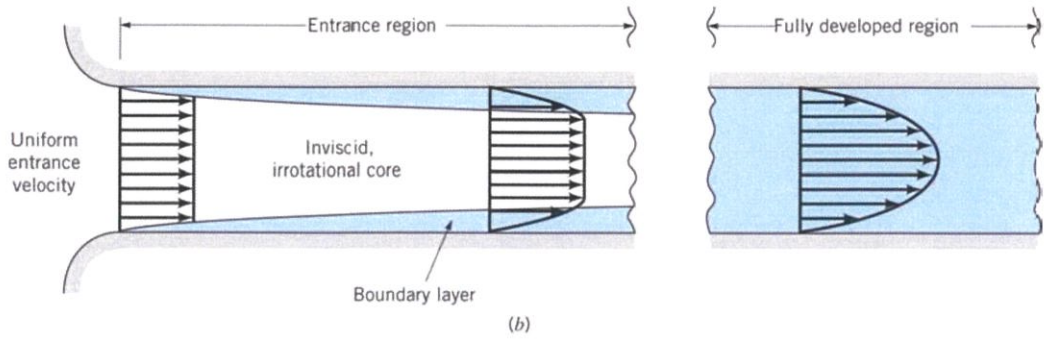
สำหรับการไหลภายในท่อต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (Entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow) หรือเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซึ่งการไหลแบบราบเรียบนั้นจะมีเส้นของการไหลอย่างเป็นระเบียบเกิดขึ้น ส่วนการไหลแบบปั่นป่วนจะมีการไหลที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งจะใช้เลขเรโนลด์ในการกำหนดแยกรูปแบบการไหล

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (3.1)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วในการไหล, L คือ ความยาวตลอดช่วงการไหล และ ν คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลนศาสตร์

เนื่องจากเลขเรโนลด์เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างแรงขับเคลื่อนของการไหลต่อความหนืด ดังนั้นจะเห็นว่าถ้าเลขเรโนลด์มีค่ามากก็สามารถแสดงเป็นเชิงสัมพันธ์ให้เห็นว่าผลกระทบ (Effect) ของค่าความหนืดจะมีค่าน้อย เลขเรโนลด์ที่อยู่ในระหว่างเปลี่ยนจากการไหลแบบเป็นชั้นไปสู่การไหลแบบปั่นป่วนนั้นเรียกว่า “เลขเรย์โนลด์สวิกฤติ (Critical Reynolds, Re_c)”

เลขเรย์โนลด์สวิกฤติ Re_c ของการไหลภายในท่อที่ได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์แล้ว คือ เลขเรย์โนลด์ที่การไหลเปลี่ยนจากการไหลราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่า $Re_c = 2,300$ หรืออยู่ในช่วงระหว่าง $2,000 - 4,000$ โดยประมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนในการไหล ความขรุขระภายในท่อที่ไหล หรือรูปทรง และสภาพของทางเข้า ส่วนเลขเรย์โนลด์ที่ต่ำกว่า $2,000$ ไม่ว่าท่อจะมีความยาวมากเพียงใด การไหลก็จะไม่เปลี่ยนแปลงไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน จะยังคงรักษาสภาพการไหลแบบเป็นชั้น หรือราบเรียบต่อไป โดยรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นการกระจายความเร็วที่ได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์การกระจายความเร็วจะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ



รูปที่ 3.2 การไหลอย่างสมบูรณ์ภายในท่อกลม

โดยทั่วไปสำหรับการไหลในท่อผิวเรียบ เลขเรย์โนลด์สวิกฤตของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_D > 4,000$ และความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวเข้าสู่ช่วงสมบูรณ์หาได้จากสมการ

$$\left(\frac{L_e}{D}\right)_{turb} \approx 4.4 Re_D^{1/6} \quad (3.2)$$

3.3.2 การไหลในท่อกลม

การไหลในท่อกลมที่บริเวณทางเข้าท่อที่แสดงในรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าตั้งแต่ที่บริเวณทางเข้า ชั้นขอบเขตของความเร็วจะค่อยๆ พัฒนาเพิ่มขึ้นที่ละเล็กที่ละน้อย จนถึงระยะทางค่าหนึ่ง (L_e) ชั้นของความเร็วจะซ้อนกันทั้งบนและล่าง หลังจากนั้นการกระจายความเร็วจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง เรียกว่าการไหลได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์ (Fully Developed) ค่าเรย์โนลด์ Re สำหรับการไหลภายในท่อนั้นถ้าให้ V เป็นค่าความเร็วเฉลี่ย D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของพื้นที่ตัดขวางท่อแล้วจะได้

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{[M / (\pi D^2 / 4)] D}{\mu} \quad (3.3)$$

ค่า ρV [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] จะเป็นค่าการไหลของมวลสารต่อพื้นที่หน้าตัดในการไหล สำหรับในกรณีของแก๊สนั้น การเพิ่มความร้อนภายในท่อจะทำให้แก๊สขยายตัวมีความเร็ว V เพิ่มขึ้น ค่า ρV จะไม่เปลี่ยนแปลงถ้าพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สะดวกในการคำนวณ นอกจากนั้นโดยปกติจะถือว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด μ จะไม่เปลี่ยนแปลงไปกับความดัน ส่วนค่าความหนืดเชิงจลนศาสตร์ ν ซึ่งเท่ากับ μ / ρ ในกรณีของแก๊สจะเป็นค่าที่ผกผันกับความดันซึ่งจะต้องระมัดระวัง

เมื่อ D คือ ความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหลหรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) มีนิยามเป็น

$$D = \frac{4A_c}{P} \quad (3.4)$$

เมื่อค่า A_c และ P เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของหน้าตัดตามลำดับ โดยทั่วไปสำหรับการไหลในท่อผิวเรียบ

3.3.3 ตัวประกอบความเสียดทาน

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

$$f_{Darcy} = \frac{(\Delta p / L) D}{\rho u_0^2 / 2} \quad (3.5)$$

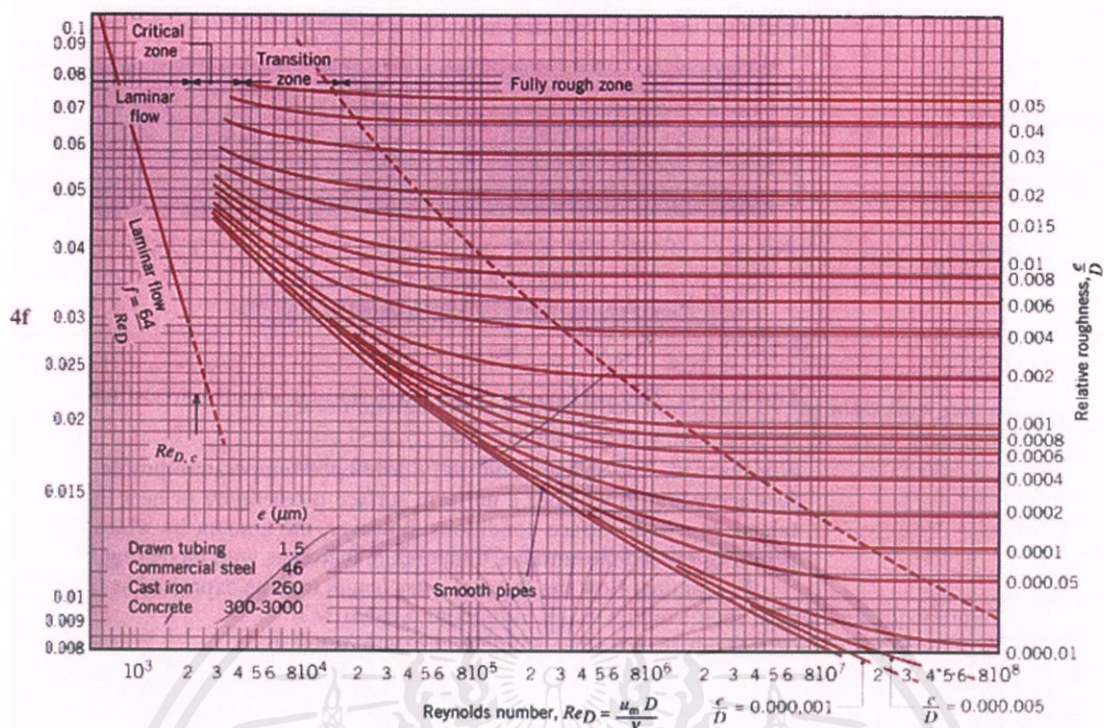
เมื่อค่า L คือช่วงความยาวที่วัดค่าความดันตกคร่อม และค่า f_{Darcy} นี้แตกต่างกับค่าตัวประกอบความเสียดทาน f ซึ่งเรียกว่าตัวประกอบความเสียดทานเฟนนิ่ง มีสมการดังนี้

$$f = \frac{f_{Darcy}}{4} \quad (3.6)$$

เมื่อเกิดการไหลภายในท่อ จะเห็นว่าเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ที่จะต้องมีการสูญเสียพลังงานจำนวนหนึ่งสูญเสียไป โดยความดันจะลดลง ความดันที่สูญเสีย Δp ไปนี้ สามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$\frac{\Delta p}{\rho} = 0.5KV^2 \quad (3.7)$$

โดยในที่นี้ ค่า K จะเป็นค่า “สัมประสิทธิ์ของการสูญเสียความดัน”



รูปที่ 3.3 แผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์กันระหว่างค่า f และค่า Re

3.4 การพาความร้อน

การพาความร้อน หมายถึง กระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล โดยมากการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุมักจะสำคัญกว่าการถ่ายเทความร้อนภายในตัวของไหลเอง การพาความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งจากการไหลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือความหนาแน่น) ซึ่งจะเรียกว่า การพาความร้อนตามธรรมชาติ และการไหลที่เกิดขึ้นจากปั๊มหรือพัดลม จะเรียกว่า การพาความร้อนด้วยการบังคับ

3.4.1 ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน

ถ้าของไหลที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอไหลเข้าสู่ในท่อที่มีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขีดผิวของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิว, T_s คงที่ หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิว, q_s'' คงที่ สภาวะพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (thermally fully developed condition) ก็เกิดขึ้น

โดยฟลักซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.8)$$

โดยที่ T_s คืออุณหภูมิพื้นผิว

T_m คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

พลັกซ์ความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างรวมทั้งหมดระหว่างผนังกับของไหล ซึ่ง h คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาบางครั้งเรียกว่าการนำผ่านฟิล์ม เพราะความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลที่บริเวณผิวของผนัง ค่า T_m จะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการไหลนั่นคือ dT_m/dx จะไม่เป็นศูนย์ ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ T_m จะเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหล x ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนจากผิวสู่ของไหล

3.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

การพาความร้อนระหว่างวัตถุกับของไหลเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุรวม ประเภทของของไหล รวมทั้งโครงสร้างของชั้นผิวสัมผัส เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เราสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในรูปของฟังก์ชันของปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้ ในการพาความร้อนด้วยการบังคับ โดยปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน h [$W/(m^2 \cdot K)$] ความเร็วของกระแสหลัก u_i [m/s] ความยาวที่เป็นตัวแทนของวัตถุหรือระยะทาง D [m] (ตัวอย่าง เช่น ในกรณีของการไหลในท่อ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน หรือ ในกรณีของการไหลบนแผ่นวัตถุ ได้แก่ ระยะทางจากขอบแผ่นวัตถุ เป็นต้น) สัมประสิทธิ์ความหนืดของของไหล μ [$Pa \cdot s$] ความหนาแน่น ρ [kg/m^3] ความร้อนจำเพาะ C_p [$J/(kg \cdot K)$] สัมประสิทธิ์การนำความร้อน k [$W/(m \cdot K)$] ซึ่งจากการทำ Dimensional analysis พบว่าปรากฏการณ์การพาความร้อนด้วยการบังคับสามารถอธิบายด้วยฟังก์ชันของปริมาณต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{hD}{k}\right) = f\left\{\left(\frac{u_i D}{\mu/\rho}\right), \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)\right\} \quad (3.9)$$

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

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.10)$$

$$Re = \frac{u_i D}{\mu/\rho} = \frac{u_i \mu}{\nu} \quad (3.11)$$

$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{u / \rho}{k / (C_p / \mu)} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.12)$$

ในที่นี้ ν เป็นสัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ ($\nu = \mu / \rho$) และ α เป็น Thermal diffusivity ($\alpha = k / (C_p \mu)$) ดังนั้น สมการที่ 3.13 จึงเขียนได้ว่า

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (3.13)$$

กล่าวคือ Nu สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันของ Re กับ Pr

3.4.3 ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน

ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนหรือค่าสมรรถนะเชิงความร้อน, TEF คือ อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นที่ผิวทดสอบ (h) เทียบกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนพื้นผิวเรียบ (h_0) ที่กำลังขับเดียวกันซึ่งเป็นตัวชี้วัดค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนที่ได้รับ สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{TEF} = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} \bigg|_{pp} = \left(\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (3.13)$$

$$\text{TEF} = \frac{(\text{Nu} / \text{Nu}_0)}{(f / f_0)^{1/3}} \quad (3.14)$$

เมื่อ Nu คือ ค่าเลขนัสเซิลท์จากการถ่ายเทความร้อนที่ได้

Nu_0 คือ ค่าเลขนัสเซิลท์จากท่อเปล่าผิวเรียบ

f คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ได้

f_0 คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานจากท่อเปล่าผิวเรียบ

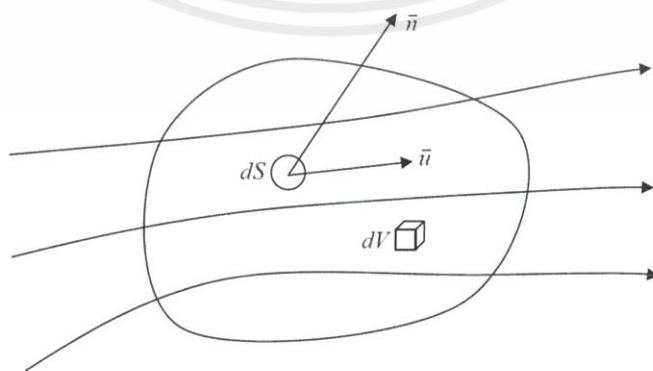
3.5 สมการพื้นฐานสำหรับการไหล

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือช่วยแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) คำนวณเพื่อประมาณผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อน ซึ่งมีความยุ่งยากในการหาผลเฉลยด้วยวิธีแมนตรง หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับสมการบังคับซึ่งสมการบังคับพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการโมเมนตัม (Momentum Equation) และสมการพลังงาน (Energy Equation) สมการดังกล่าวบ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพของของไหลและสิ่งที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการไหล โดยสมการบังคับเหล่านี้จะได้มาจากหลักทางกายภาพ 3 หลักด้วยกันคือ กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) และสมการบังคับที่ได้จะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประมาณผลเฉลยของสมการอนุพันธ์สำหรับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference) ระเบียบวิธีจำกัดมูลฐาน (Finite Element) และ ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume) เป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์การไหลในเครื่องสูบน้ำ เป็นกรณีที่ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะเกิดการไหล จะใช้เพียงกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงขอเน้นเฉพาะกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเท่านั้น

3.5.1 กฎอนุรักษ์มวล

เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมของไหลต่อเนื่องในสนามการไหลดังรูปที่ 3.4 การส่งถ่ายมวลเข้าออกปริมาตรควบคุม จะเป็นไปตามหลักการอนุรักษ์มวลคือ

อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลภายในปริมาตรควบคุม = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่ไหลผ่านผิวควบคุม



รูปที่ 3.4 ปริมาตรควบคุม

สามารถเขียนในรูปของสมการ คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (3.15)$$

สมการ (3.15) มีชื่อเรียกว่า สมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) เมื่อพิจารณาการไหลในเครื่องสูบน้ำให้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) พบว่าความหนาแน่นของน้ำคงที่ จะได้สมการต่อเนื่องเป็น

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.16)$$

3.5.2 กฎอนุรักษ์โมเมนตัม

หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเป็นการประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันและเมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมจะได้ว่า

อัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัมปริมาตรควบคุม = แรงลัพธ์สุทธิที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม

อัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัมของปริมาตรควบคุมเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุมกับโมเมนตัมสุทธิที่ไหลผ่านผิวควบคุม ดังสมการ

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V (\rho \bar{u}) dV + \iint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) \quad (3.17)$$

แรงลัพธ์สุทธิที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดแรกเป็นแรงเนื่องจากสนามดึงดูด (Field Force) ซึ่งได้แก่ แรงโน้มถ่วงโลก (Body Force) และแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิดที่สองเป็นแรงที่กระทำที่ผิว (Surface Force) ซึ่งแบ่งออกเป็นแรงในแนวตั้งฉาก ได้แก่ ความดัน ความเค้นอัดหรือดึง และแรงในแนวขนานกับผิว ได้แก่ ความเค้นเฉือน ดังสมการ

$$\iiint_V \rho \bar{f} dV + \iint_S \bar{\sigma} d\bar{S} \quad (3.18)$$

ดังนั้นสมการโมเมนตัม คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \bar{u} dV + \iint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) = \iiint_V \rho \bar{f} dV + \iint_S \bar{\sigma} d\bar{S} \quad (3.19)$$

ใช้ทฤษฎีของเกาส์ช่วยในการเปลี่ยนรูปสมการดังนี้

$$\oint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) = \iiint_V \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) dV \quad (3.20)$$

$$\oint_S \bar{\sigma} d\bar{S} = \iiint_V \nabla \cdot \bar{\sigma} dV \quad (3.21)$$

จะได้สมการโมเมนตัมในรูปสมการอนุพันธ์เชิงย่อยดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \bar{u} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = \rho \bar{f} + \nabla \cdot \bar{\sigma} \quad (3.22)$$

เรียกสมการ (3.22) ว่าสมการนาเวียร์-สโตคส์ (Navier-Stokes Equation) และสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปเทนเซอร์ (Tensor) ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_k)}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad (3.23)$$

พิจารณาแยกเทอม $\rho u_j u_k$ เป็น ρu_k และ u_j แล้วจัดรูปสมการอนุพันธ์เชิงย่อยใหม่
จะได้

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad (3.24)$$

ใช้สมการความต่อเนื่องเพื่อกำจัดเทอมที่สองและสาม จะได้สมการนาเวียร์-สโตคส์ดังนี้

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad (3.25)$$

โดย

$$\sigma_{ij} = -\rho \delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (3.26)$$

สำหรับของไหลแบบนิวตัน (Newtonian Fluid) ซึ่งความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไหล ได้เทนเซอร์ความเค้นเฉือน (Shear Stress Tensor) คือ

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.27)$$

แทนค่าเทนเซอร์ความเค้นเฉือนในสมการ (3.2 6) ได้เทนเซอร์ความเค้น (Stress Tensor) คือ

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.28)$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute or Dynamic Viscosity Coefficient)

λ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง (Second Viscosity Coefficient)

δ_{ij} คือ Kronecker Delta (มีค่าเป็น 1 เมื่อ $i = j$ และมีค่าเป็น 0 เมื่อ $i \neq j$)

สโตกส์ (Stokes) ตั้งสมมติฐานความสัมพันธ์ระหว่าง μ และ λ ไว้ดังนี้

$$\lambda = -\frac{2}{3} \mu \quad (3.29)$$

แทนค่าเทนเซอร์ความเค้นในสมการนาเวียร์-สโตกส์ ได้สมการนาเวียร์-สโตกส์ที่สมบูรณ์ คือ

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho f_j \quad (3.30)$$

เมื่อพิจารณาการไหลในเครื่องสูบน้ำให้การไหลแบบอัดตัวไม่ได้และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ ทำให้เทอมที่สองทางด้านขวามือของสมการ (3.56) มีค่าเป็นศูนย์และเทอมที่สามสามารถจัดรูปสมการใหม่เป็น

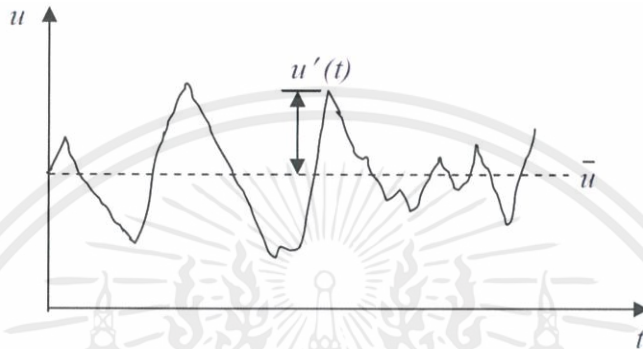
$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] = \mu \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} \right] = \mu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} \quad (3.31)$$

จะได้สมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับกรณีไหลแบบอัดตัวไม่ได้และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ ดังนี้

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} + \rho f_j \quad (3.32)$$

3.5.3 การไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบปั่นป่วน ค่าของตัวแปรต่างๆมีค่าไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป เช่น ความเร็ว เป็นต้น ดังภาพที่ 3.5 แสดงค่าของความเร็ว u ในการไหลแบบปั่นป่วน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้มีความยุ่งยากในการคำนวณค่าตัวแปร เพื่อให้สามารถคำนวณได้ง่ายจึงสมมุติให้คุณสมบัติต่างๆ ที่พิจารณาแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนปริมาณเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา เช่น \bar{u} หรือ \bar{p} กับส่วนที่กระเพื่อม (Fluctuation) เช่น u' หรือ p'



รูปที่ 3.5 ค่าความเร็ว u ในการไหลแบบปั่นป่วน

เมื่อทำการเฉลี่ยปริมาณใดๆ ในสมการควบคุมตลอดช่วงเวลาช่วงหนึ่ง จะทำให้เกิดตัวแปรขึ้นมาใหม่ ส่งผลให้มีจำนวนตัวแปรไม่รู้ค่ามากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ จึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) มาช่วย เพื่อทำให้ปัญหาเป็นปัญหาแบบปิด (Close Problem) ให้สามารถหาคำตอบได้

สมการบังคับของการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ มีอุณหภูมิคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ ประกอบด้วย

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.33)$$

สมการนาเวียร์-สโตคส์

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.34)$$

จากการสมมติให้ตัวแปรต่างๆ สามารถแบ่งออกเป็นส่วนของค่าเฉลี่ยและส่วนของการกระเพื่อม ตัวอย่างเช่น ตัวแปรใดๆ ϕ แบ่งออกเป็น

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (3.35)$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (Time-Averaging) จะได้

$$\phi(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \phi(x, t) dt \quad (3.36)$$

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยแล้ว จะทำให้ค่าเฉลี่ยในส่วนของการกระเพื่อมมีค่าเป็นศูนย์ ($\bar{\phi}' = 0$) และจะได้ค่าเฉลี่ยของผลคูณทั้งสองตัวแปรเป็น ($\overline{\phi\beta} = \bar{\phi}\bar{\beta} + \overline{\phi'\beta'}$)

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ด้วยผลรวมของค่าเฉลี่ยและส่วนของการกระเพื่อม แล้วทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง จะได้สมการบังคับเป็น

สมการความต่อเนื่องสำหรับค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.37)$$

สมการนาเวียร์-สโตคส์สำหรับค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.38)$$

สมการ (3.37) และ (3.38) เรียกว่า สมการนาเวียร์-สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation, RANS) จะสังเกตได้ว่าสมการที่ได้นี้มีรูปแบบคล้ายคลึงกับสมการนาเวียร์-สโตคส์ เพียงแต่มีเทอมของ ค่าความเค้นของเรย์โนลด์ (Reynolds Stress) $\tau_{ij} = \overline{\rho u'_i u'_j}$ เพิ่มขึ้นมาในสมการ ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วนนั่นเอง

3.5.4 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$

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

(1) ทฤษฎี RNG ให้สมการสำหรับการวิเคราะห์เลขพรานด์ของความปั่นป่วน ในขณะที่แบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานจะใช้วิธีระบุเป็นค่าคงที่

(2) แบบจำลอง RNG นั้นได้รวมอิทธิพลของการหมุนวน (rotation หรือ swirl) ต่อการไหลปั่นป่วน และเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลหมุนวน

(3) แบบจำลอง RNG ได้เพิ่มพจน์เข้าไปในสมการ ε ซึ่งมีส่วนสำคัญในการปรับปรุงความแม่นยำสำหรับการไหลที่เกิดความเครียดอย่างรวดเร็ว

(4) ในขณะที่แบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐานเป็นแบบจำลองสำหรับเลขเรย์โนลด์สูง แต่ทฤษฎี RNG ให้สมการการวิเคราะห์ในรูปแบบสมการอนุพันธ์สำหรับค่าความหนืดยังผล (μ_{eff}) ที่ใช้ในการคำนวณสำหรับอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่ำ ซึ่งผลของการคำนวณในลักษณะนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการจำลองการไหลที่ใกล้กับผนัง

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

สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (3.40)$$

ค่าความหนืดยังผล (μ_{eff}) โดยทั่วไปมีสมการเป็น

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.41)$$

ค่า α_k และ α_ε คือเลขพรานด์ยังผลผกผัน (inverse effective Prandtl numbers) สำหรับค่า k และ ε ตามลำดับ ซึ่งถูกคำนวณจากสมการที่ได้พัฒนาขึ้นมาจากทฤษฎี RNG ดังนี้

$$\frac{|\alpha - 1.3929|^{0.6321}}{|\alpha_0 - 1.3929|} \frac{|\alpha + 2.3929|^{0.3679}}{|\alpha_0 + 2.3929|} = \frac{\mu}{\mu_{eff}} \quad (3.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ความแตกต่างที่สำคัญของแบบจำลอง RNG กับแบบจำลอง $k-\epsilon$ มาตรฐาน ก็คือการเพิ่มค่า R_ϵ เข้าไปในสมการ ϵ ซึ่งกำหนดโดย

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \quad (3.43)$$

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

อิทธิพลของ R_ϵ ของสมการ ϵ ในแบบจำลอง RNG สามารถเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อจัดรูปใหม่ จะได้สมการดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.44)$$

$$\text{เมื่อ} \quad C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (3.45)$$

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

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

ทฤษฎี RNG ให้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับการวิเคราะห์ความหนืดอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน (turbulent viscosity) ดังนี้

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (3.46)$$

เมื่อ $\hat{v} = \mu_{eff} / \mu$ และ $C_v \approx 100$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (3.46) จะได้ค่าที่แม่นยำของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนย้าย ที่เกิดจากอิทธิพลของความปั่นป่วนกับอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ (หรือในระดับการหมุนวนขนาดเล็ก) ซึ่งแบบจำลองนี้จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดสำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำในบริเวณใกล้กับผนัง

ในกรณีการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง สมการที่ (3.46) จะเปลี่ยนไปเป็น

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.47)$$

โดยที่ค่า $C_\mu = 0.0875$ ซึ่งค่านี้ได้มาจากทฤษฎี RNG และมีข้อสังเกตที่น่าสนใจว่าค่า C_μ นี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทดลองที่มีค่า $C_\mu = 0.09$ ในสมการแบบจำลอง $k-\varepsilon$ มาตรฐาน โดยทั่วไปแล้วอิทธิพลเนื่องจากความหนืดปั่นป่วนนั้นจะถูกคำนวณโดยใช้การคำนวณในกรณีเลขเรย์โนลด์สูงในสมการที่ (3.47) อย่างไรก็ตามเมื่อต้องการรวมอิทธิพลของการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ แบบจำลอง RNG จะมีทางเลือกที่สามารถใช้ได้โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ดังได้แสดงในสมการที่ (3.47)

ค่าคงที่ในสมการของแบบจำลอง RNG แสดงได้ดังนี้

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

3.6 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

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

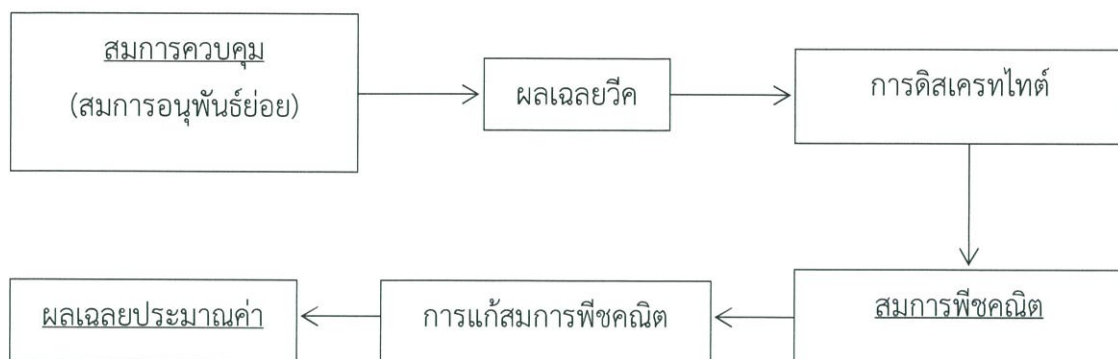
3.6.1 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

หากพิจารณาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในมุมมองการใช้โปรแกรม จะกล่าวได้ว่าเป็นโครงสร้างของอัลกอริทึมที่สามารถนำไปสู่การจำลองสภาวะการไหลได้ โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในเชิงพาณิชย์ ส่วนมากมีระบบที่ให้ผู้ใช้งานสามารถป้อนค่าต่างๆ ที่ต้องการแล้วจึงนำไปคำนวณ โดยแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

3.6.2 ขั้นตอนประมวลผล

ขั้นตอนประมวลผล (Pre-processing) คือ ขั้นตอนเตรียมการ โดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหาและพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1. กำหนดรูปทรงและระบุนขนาดของระบบที่สนใจ เรียกว่า การกำหนดสนามการคำนวณ (Computational domain)
2. กำหนดจำนวนและรูปแบบการจัดวางกริด(Grid or Mesh) ซึ่งคือการแบ่งสนามการคำนวณออกเป็นปริมาตรเล็กๆ รูปแบบการจัดแบ่งและการจัดวางกริด ขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณาการจัดที่เหมาะสมทำให้การหาผลเฉลยประมาณค่า (Approximation solution) แม่นยำขึ้น
3. เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมกับธรรมชาติของปัญหา เลือกโดยใช้อองค์ความรู้ทางทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง
4. กำหนดคุณสมบัติของของไหล เช่น พิจารณาของไหลเป็นน้ำที่อุณหภูมิปกติ เป็นต้น
5. กำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) และค่าเริ่มต้น (Initial condition)



รูปที่ 3.6 ความเชื่อมโยงของกระบวนการดิสเครทไทต์และผลเฉลยประมาณค่า

3.6.3 ชั้นประมวลผล

ชั้นประมวลผล (Solving) เป็นชั้นที่ต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหา ซึ่งการคำนวณในงานวิจัยนี้ทั้งหมดใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยมีขั้นตอนดังนี้ (จากรูปที่ 3.6)

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

3.6.4 ชั้นแสดงผล

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

3.7 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติ ควรตระหนักว่าธรรมชาติมักมีพฤติกรรมซับซ้อน ดังนั้นสิ่งที่พึงระวังอย่างยิ่งคือ ความถูกต้องของผลเฉลย ผลการคำนวณที่ตีเลิศ เป็นเพียงค่าประมาณที่ดีที่สุดเท่าที่มนุษย์สามารถหาค่าตอบได้เท่านั้น ไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรง

คุณสมบัติของวิธีการคำนวณ คือปัจจัยบ่งบอกความเที่ยงตรงของผลเฉลยประมาณค่า เมื่อเทียบกับพฤติกรรมจริงที่ควรเกิดขึ้น แบ่งได้หลายประการดังนี้

3.7.1 ความเข้ากันได้

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

3.7.2 เสถียรภาพการคำนวณ

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

3.7.3 การลู่เข้าของผลเฉลย

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

3.7.4 การอนุรักษ์

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

3.7.5 ความจำกัดขอบ

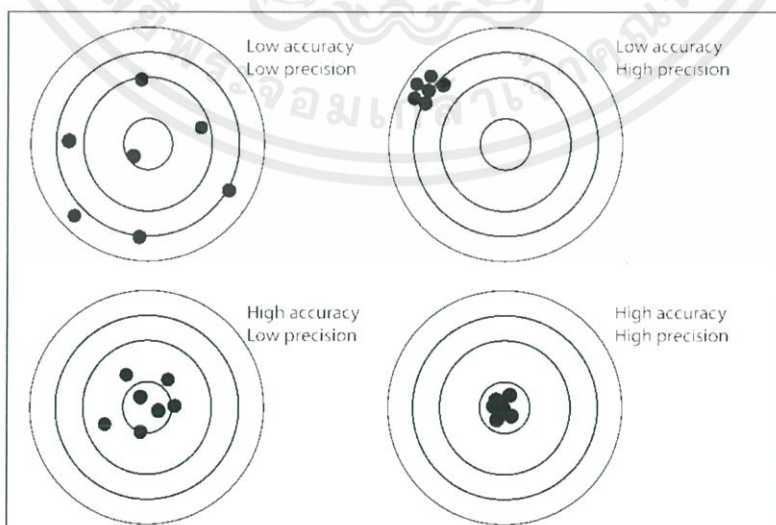
ความจำกัดขอบ (Bounded ness) หมายถึงผลเฉลยควรมีค่าอยู่ในขอบเขตจำกัด เช่น ความหนาแน่น ความเข้มข้น ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ หรือระบบการถ่ายเทความร้อนที่ทราบอุณหภูมิต่ำสุด-สูงสุด ผลเฉลยที่ได้ควรมีค่าอยู่ในช่วงนั้นด้วยเช่นกัน โดยวิธีการคำนวณที่มีอันดับสูง (Higher order) มีแนวโน้มความจำกัดขอบต่ำลง ดังนั้นจึงไม่ควรเลือกใช้วิธีการคำนวณที่มีอันดับสูงมากเกินไปจนจำเป็น

3.7.6 ความเสมือนจริง

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

3.7.7 ความแน่นอน

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



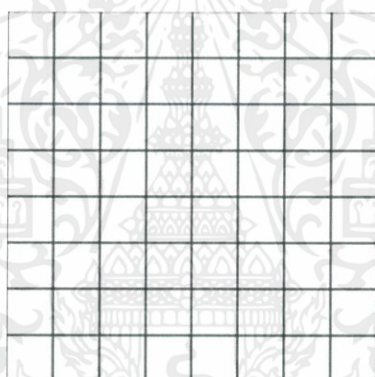
รูปที่ 3.7 แนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ

วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล แบ่งปัจจัยของความแน่นอนได้เป็น 3 ปัจจัยดังนี้

1. ความแน่นอนจากแบบจำลอง (Modeling accuracy) เกิดจากความเหมือนจริงของแบบจำลองเทียบกับพฤติกรรมความจริงตามธรรมชาติ
2. ความแน่นอนจากการดิสครีไทต์ (Discretization accuracy) เกิดจากความเข้ากันได้ของสมการพีชคณิตเทียบกับสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย)
3. ความแน่นอนจากการแก้สมการพีชคณิต (Iteration accuracy) เกิดจากการลู่อ้างของผลเฉลยประมาณค่าเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการพีชคณิต

3.8 รูปแบบการจัดวางกริด

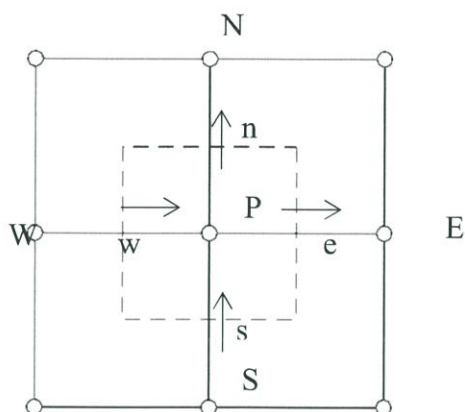
รูปแบบการจัดวางกริดโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ แบบโครงสร้างปกติ (Structured grids) แบบกลุ่มโครงสร้าง (Block structured grid) และแบบไม่เป็นโครงสร้าง (Unstructured grids) เพื่อความกระชับได้ดิสครีไทต์กริด 2 มิติเท่านั้น ซึ่งสามารถขยายไปสู่กริดแบบ 3 มิติได้โดยตรง



รูปที่ 3.8 การจัดวางกริดแบบโครงสร้างปกติ



รูปที่ 3.9 การจัดวางกริดแบบไม่เป็นโครงสร้าง



รูปที่ 3.10 ส่วนแรเงาแสดงตำแหน่งของปริมาตรควบคุมแบบ 2 มิติ

จากรูปที่ 3.10 ตำแหน่ง P คือตำแหน่งโนด (Node) ที่สนใจ ตัวอักษรพิมพ์เล็กเช่น w, e แสดงถึงตำแหน่งของปริมาณที่เข้า-ออกจากปริมาตรควบคุมที่แรเงา (Cell volume) เช่น ความเร็ว เป็นต้น เรียกว่า ตำแหน่งผิวเซลล์ (Cell face) ลูกศรที่ปรากฏแสดงทิศเป็นบวกของปริมาณเวกเตอร์ที่ตำแหน่งผิวเซลล์ รูปแบบลักษณะนี้เรียกว่า การจัดเรียงแบบตำแหน่งร่วม (Co-located arrangement) กล่าวคือ ปริมาณสเกลาร์และเวกเตอร์มีตำแหน่งเดียวกัน (มวล ความเร็ว ความดันและอุณหภูมิ)

บทที่ 4

การออกแบบอุปกรณ์และขั้นตอนการศึกษา

4.1 บทนำ

ในบทนี้แสดงถึงแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขผ่านโปรแกรม ANSYS ที่มีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ที่กำหนดให้อุณหภูมิผิวของท่อคงที่ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งการสร้างแบบจำลองการไหลนั้นสามารถแบ่งออกได้ดังตารางที่ 4.1 โดยกำหนดให้ท่อที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D , P คือ ระยะห่างระหว่างรอยกต, e คือ ความลึกรอยกต, L คือ ความยาวรอยกต, W คือ ความกว้างรอยกต, α คือ มุมปะทะการไหล



รูปที่ 4.1 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

α (degree)	D (mm)	จำนวนรอยกด	PR	L/D
30	25	6	0.24	0.15
				0.20
				0.25
			0.32	0.15
				0.20
				0.25
			0.40	0.15
				0.20
				0.25
45	25	6	0.24	0.15
				0.20
				0.25
		0.32	0.15	
			0.20	
			0.25	
		0.40	0.15	
			0.20	
			0.25	
8	6	0.24	0.25	
			0.25	
			0.25	
60	25	6	0.24	0.15
				0.20
				0.25
		0.32	0.15	
			0.20	
			0.25	
		0.40	0.15	
			0.20	
			0.25	

4.2 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์ปัญหา

ตัวแปรต่างที่สนใจใช้ในการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการหลักๆ ทั้งหมด 4 สมการที่เกี่ยวข้อง ประกอบไปด้วยเลขเรโนลด์ (Re), ตัวประกอบความเสียดทานแฟนนิง (f), เลขนัสเซิลท์เฉลี่ย (Nu) และค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน (TEF) ที่อยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) ซึ่งแต่ละสมการมีดังนี้

เลขเรโนลด์

$$Re = \rho u_0 D / \mu \quad (4.1)$$

ตัวประกอบความเสียดทานแฟนนิง

$$f = \frac{(\Delta p) D}{2 \rho L u_0^2} \quad (4.2)$$

เมื่อ Δp คือค่าความดันตกคร่อม และ L คือความยาวหนึ่งช่วงการไหล

เลขนัสเซิลท์เฉลี่ย

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_s dA \quad (4.3)$$

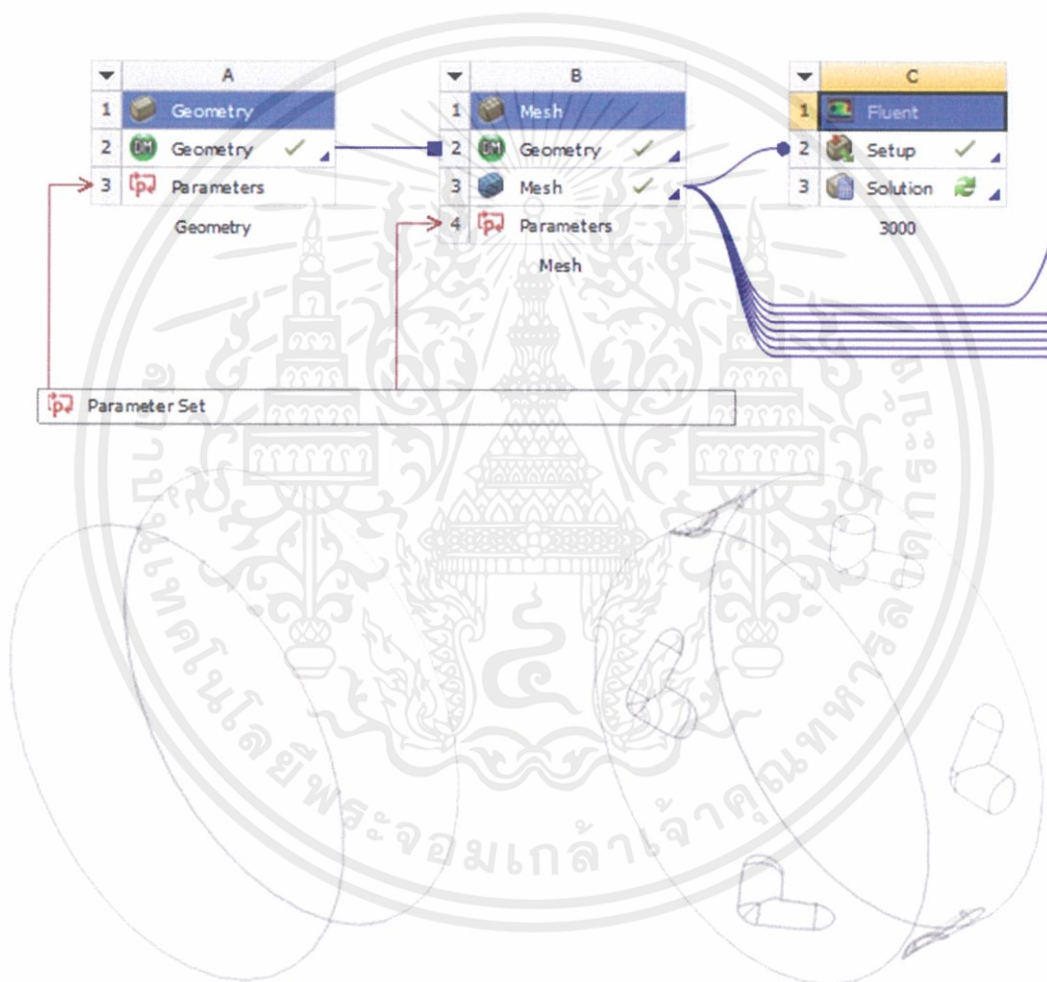
ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน

$$TEF = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \bigg|_{pp} = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (4.4)$$

4.3 การสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของท่อกลม

วิธีการสร้างแบบจำลองสามารถสร้างได้หลากหลายวิธี ในงานวิจัยนี้จะใช้คำสั่งในโปรแกรม ANSYS ทั้งหมดในการสร้างแบบจำลอง สามารถแบ่งได้เป็นขั้นตอนดังนี้

1. เลือก Geometry ในโปรแกรม ANSYS เพื่อสร้างแบบจำลองให้มีลักษณะและขนาดตามต้องการ ดังรูปที่ 4.2
2. สร้าง Mesh โดยให้ Link กับ Geometry
3. สร้างกริดใน Mesh ตามจำนวนที่ต้องการและสร้างขอบเขตทางเข้าเป็น inlet, ทางออกเป็น outlet, ผนังท่อเป็น wall, รอยกดท่อเป็น rib



รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างการสร้างแบบจำลอง

4.4 การใช้คำสั่ง Fluent ในการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้จะใช้คำสั่ง Fluent ในโปรแกรม ANSYS เพื่อทำการการศึกษาพฤติกรรมความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมที่มีการก่ดขึ้นรูปครีบริบตัววี มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

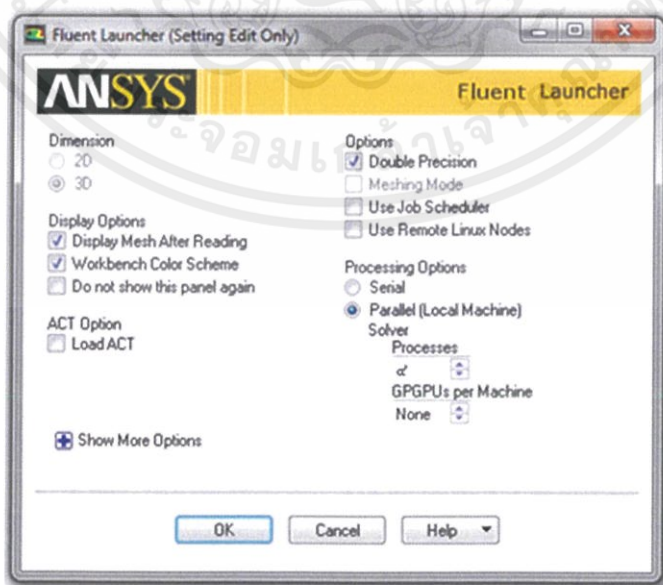
1. เลือก Fluent ตั้งค่า Dimension เป็น 3D, Display Options เลือกเป็น Display Mesh After Reading และ Workbench Color Scheme, Options เลือก Double Precision, Processing Options เลือกเป็น Parallel (Local Machine) ตั้งค่า Solver ในช่อง Processes เลือกเป็น 4, GPGPUs per Machine เลือกเป็น None ดังรูปที่ 4.3

2. เข้าสู่โปรแกรมทำการกำหนดขอบเขตทางเข้าและทางออกให้เป็น Periodic โดยพิมพ์คำสั่งในช่อง Console ดังนี้ mesh/modify-zone/make-periodic จากนั้นในช่อง Console จะขึ้น Periodic zone ให้พิมพ์ inlet ต่อมา Shadow zone ให้พิมพ์ outlet ต่อมา Rotational periodic? (if no, translational) ให้พิมพ์ no ต่อมา Create periodic zones? ให้พิมพ์ yes ต่อมา Auto detect translation vector? ให้พิมพ์ yes

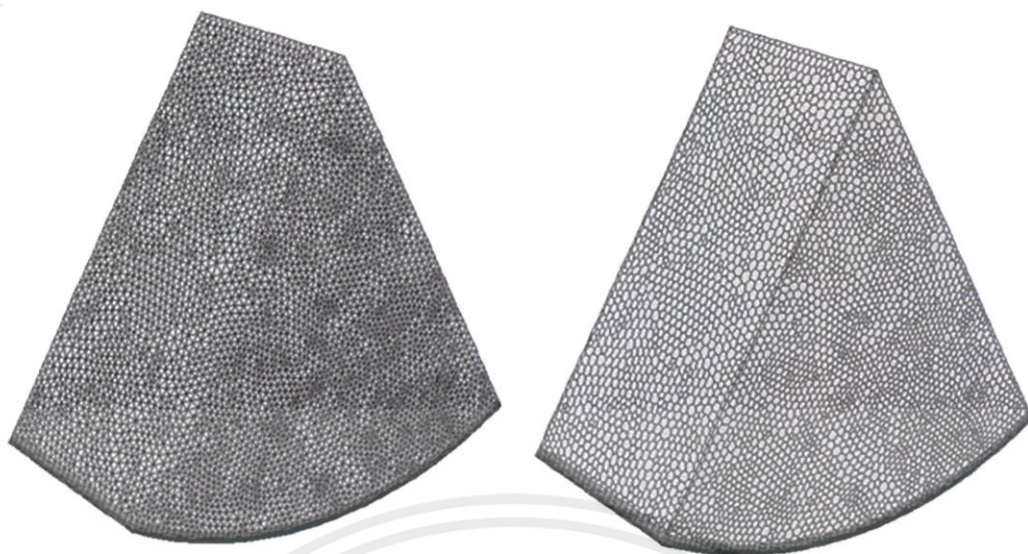
3. ใช้คำสั่ง Make Polyhedra เพื่อทำแปลงให้กริดรูปสามเหลี่ยมกลายเป็นกริดรูปหกเหลี่ยม ดังรูปที่ 4.4

4. ใน Models เปิดให้มีการคำนวณสมการพลังงาน (Energy) ดังรูปที่ 4.5 และตั้งค่า Viscous ดังรูปที่ 4.6

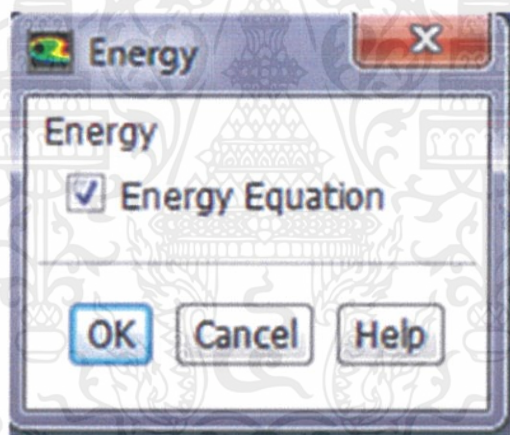
5. ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเป็นของไหลที่ใช้ในการทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิที่ 27 องศา โดยกำหนดให้คุณสมบัติของของไหลคงที่ มีความหนาแน่น 996.6 kg/m^3 ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ 4179.2 J/kg-K ค่าการนำความร้อน 0.6102 W/m-k และค่าความหนืดมีค่า $1.004016(10^{-3}) \text{ kg/m-s}$ ดังรูปที่ 4.7



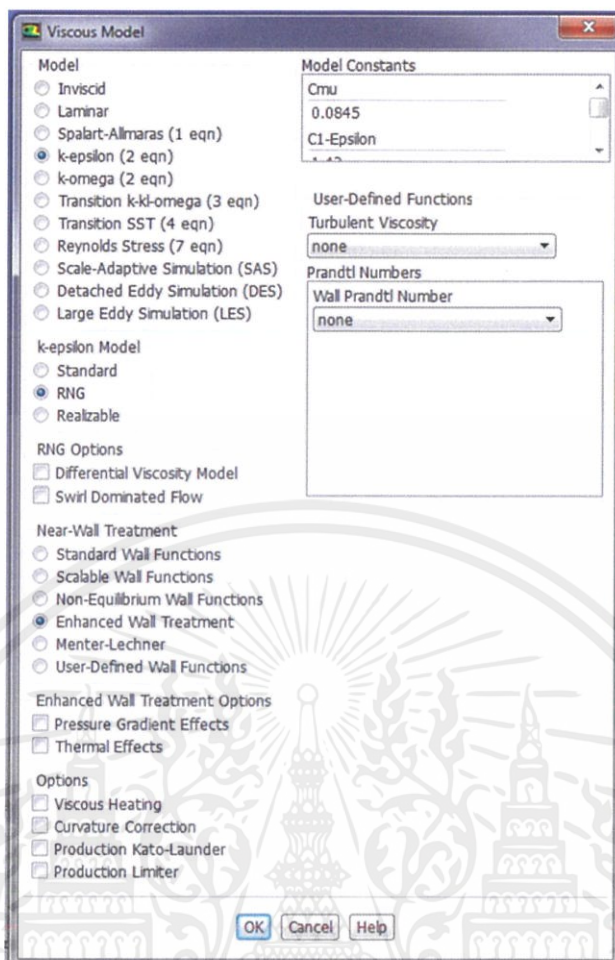
รูปที่ 4.3 การตั้งค่า Fluent



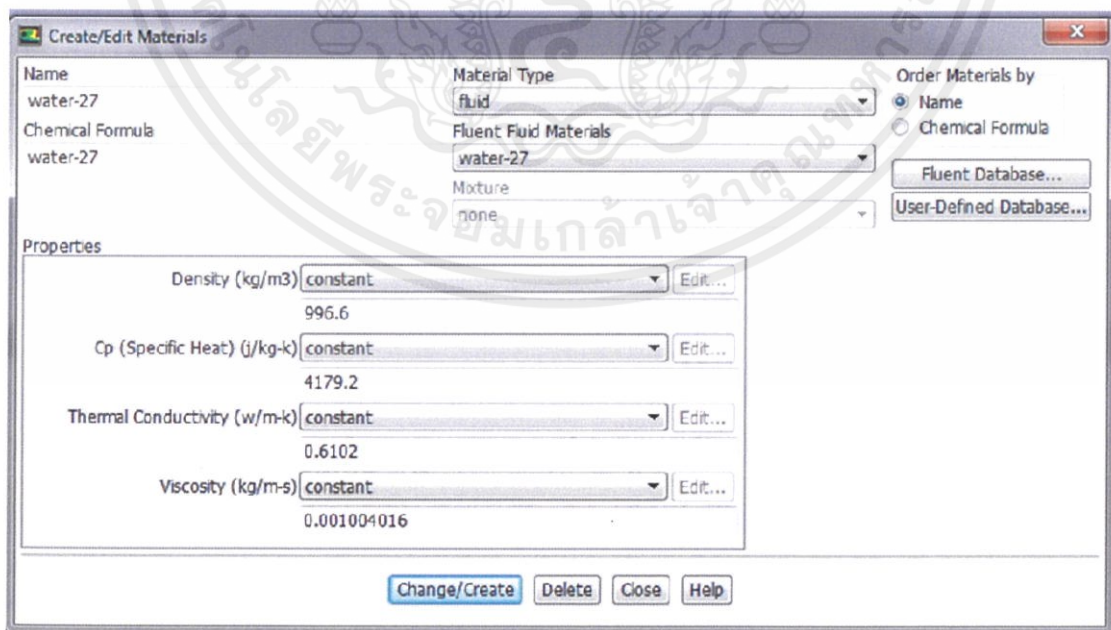
รูปที่ 4.4 แสดงการทำกริดรูปหกเหลี่ยม



รูปที่ 4.5 การเปิดการคำนวณสมการพลังงาน



รูปที่ 4.6 การตั้งค่า Viscous Model



รูปที่ 4.7 การตั้งค่าคุณสมบัติของของไหล

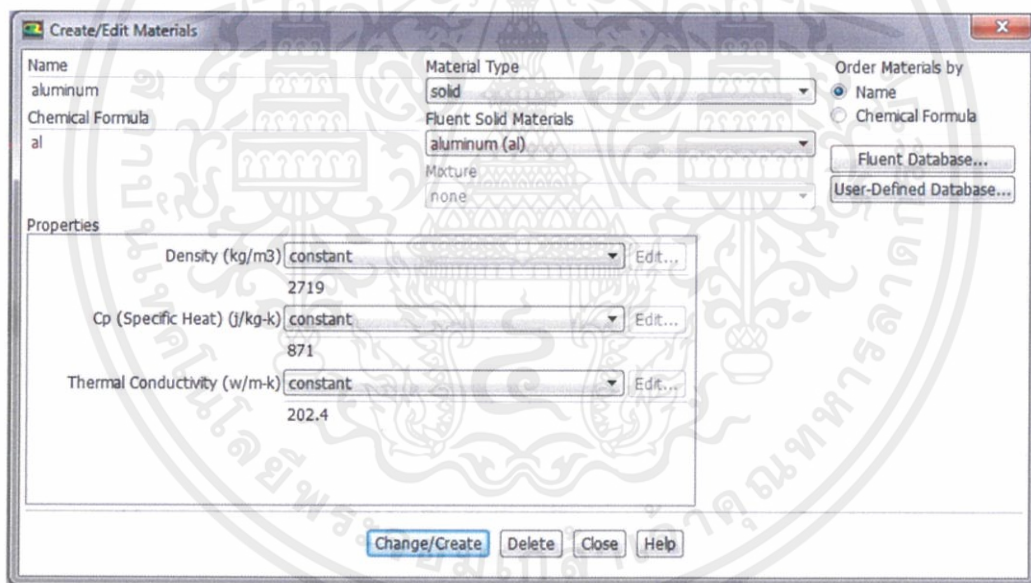
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เลือกวัสดุของท่อวงกลมให้เป็น aluminum ที่มีความหนาแน่น $2,719 \text{ kg/m}^3$ ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ 871 J/kg-K ค่าการนำความร้อน 202.4 W/m-k ดังรูปที่ 4.8

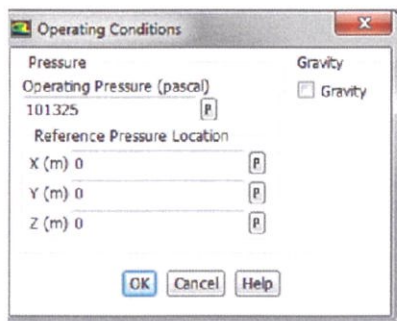
7. ตั้งค่าใน Operating Conditions ให้ความดันมีค่า $101,325 \text{ Pa}$ ตำแหน่งอ้างอิงที่ $X=0, Y=0, Z=0$ ดังรูปที่ 4.9

8. ให้ความร้อนที่ผนังท่อโดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตใน Zone เลือก wall จากนั้นในช่อง Thermal ส่วนของ Thermal Conditions เลือก Temperature กำหนดให้อุณหภูมิที่ให้กับผนังท่อคงที่ 305 K ดังรูปที่ 4.10 การให้ความร้อนกับครีบสามารถทำได้ด้วยวิธีเดียวกัน ไม่เหมือนกันตรงที่เปลี่ยน wall เป็น rib ดังรูปที่ 4.11

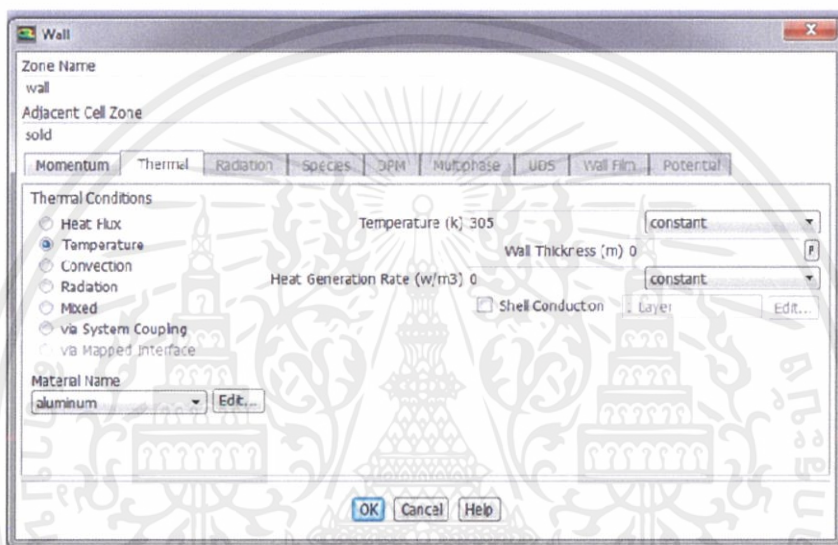
9. งานวิจัยนี้ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) $3,000 - 20,000$ โดยความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์กับอัตราการไหลเชิงมวลมีค่าตามตารางที่ 4.2 ในช่อง Periodic Conditions เปลี่ยนอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) ให้สัมพันธ์กับค่าเลขเรย์โนลด์ที่ใช้ในการคำนวณ และปรับทิศทางการไหล (Flow Direction) ให้ไปในทิศทางบวก X หรือ $X=1, Y=0, Z=0$ ดังรูปที่ 4.12



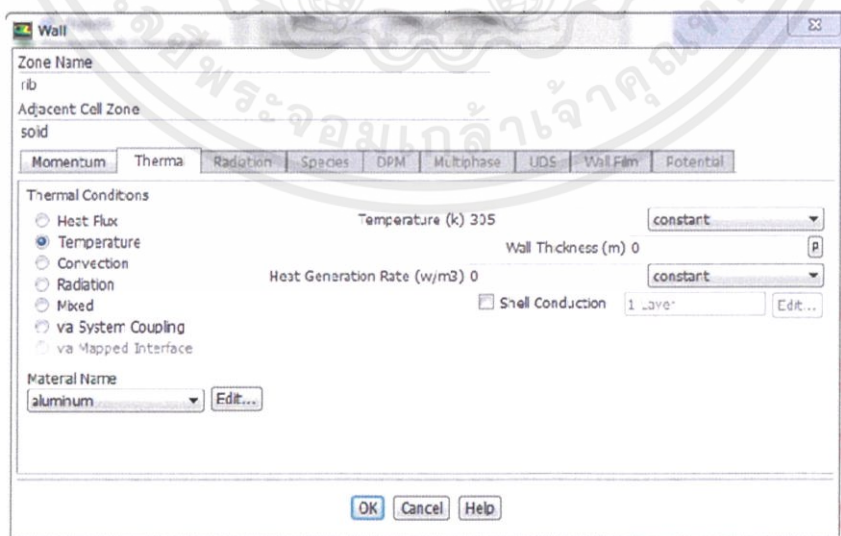
รูปที่ 4.8 แสดงคุณสมบัติวัสดุท่อ



รูปที่ 4.9 การตั้งค่า Operating Conditions



รูปที่ 4.10 การปรับค่าผนัง

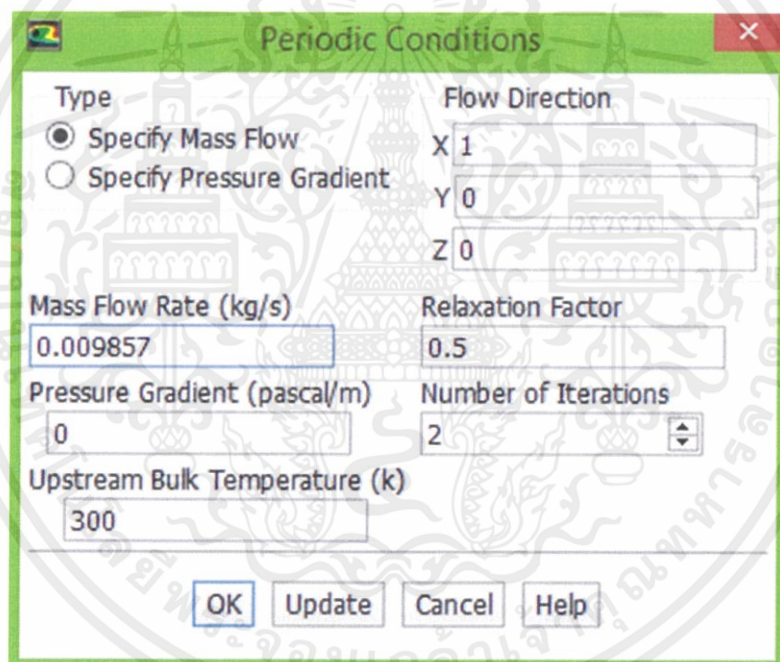


รูปที่ 4.11 การปรับค่าครีป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์กับอัตราการไหลเชิงมวล

เลขเรย์โนลด์(Reynolds number)	อัตราการไหลเชิงมวล(Mass Flow Rate)(kg/s)
3000	0.009857
4000	0.013143
5000	0.016428
8000	0.026285
12000	0.039428
16000	0.052570
20000	0.065713



รูปที่ 4.12 การปรับค่า Periodic Condition ที่เลขเรย์โนลด์ 3000

10. กำหนดค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อใน Reference Values ช่อง Length ปรับค่าเป็น 0.025 ดังรูป 4.13

11. การตั้งค่าวิธีการคำนวณ Solution Methods ในช่อง Scheme เลือก SIMPLE, Gradient เลือก Least Squares Cell Based, Pressure เลือก Second Order, Momentum เลือก QUICK, Turbulent Kinetic Energy เลือก QUICK, Turbulent Dissipation Rate เลือก QUICK, Energy เลือก QUICK ดังรูปที่ 4.14

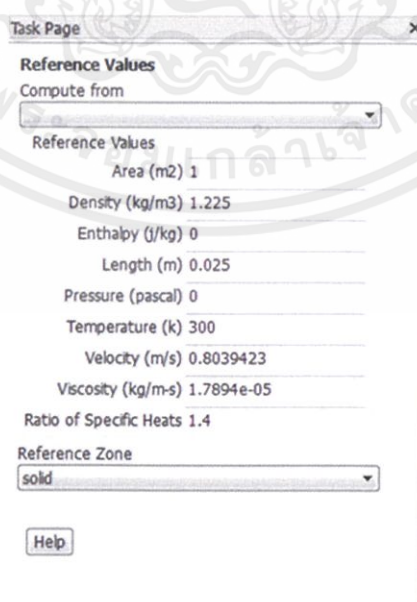
12. ตั้งค่า Solution Controls ปรับค่า Pressure ให้เป็น 0.3, Momentum เป็น 0.5, Energy เป็น 0.98 ดังรูปที่ 4.15

13. ตั้งค่า Monitors เข้าไปที่ Edit และปรับค่า Absolute Criteria ในช่อง continuity, x-velocity, y-velocity, z-velocity, k, epsilon ให้เป็น 1×10^{-5} จากนั้นตั้งค่าในช่อง Energy ให้เป็น 1×10^{-9} เพื่อให้รอบของการคำนวณหยุดที่ค่า error ที่เรที่ตั้งค่าไว้ ดังรูปที่ 4.16

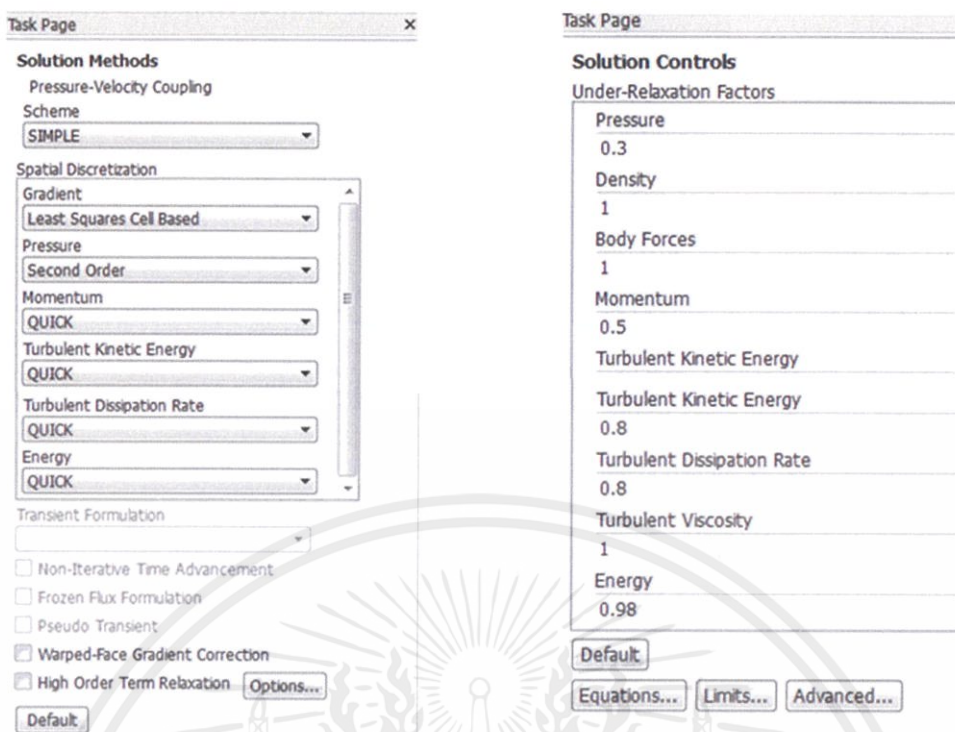
14. กำหนดค่าเริ่มต้นของการคำนวณที่ Solution Initialization ในช่อง Initialization Methods เลือก Hybrid Initialization จากนั้นกด Initialize ดังรูปที่ 4.17

15. เริ่มการคำนวณ

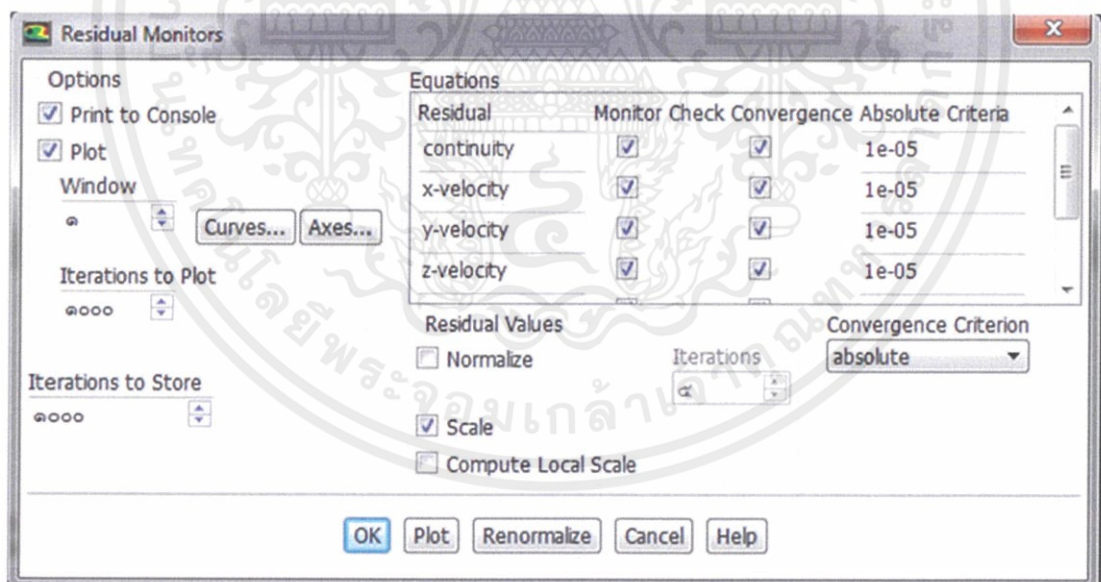
16. แสดงผลการคำนวณในช่อง Reports เลือก Surface Integrals จากนั้นในช่อง Report Type เลือก Mass-Weighted Average, Field Variable เลือก Temperature, Surface เลือก inlet นำค่าอุณหภูมิที่ได้ไปใส่ใน Reference Values ในช่อง temperature ดังรูปที่ 4.18 จากนั้น ในช่อง Report Type เลือก Area-Weighted Average, Field Variable เลือก wall fluxes ช่องถัดมาเลือก Surface Nusselt Number, Surface เลือก rib และ wall ดังรูปที่ 4.19



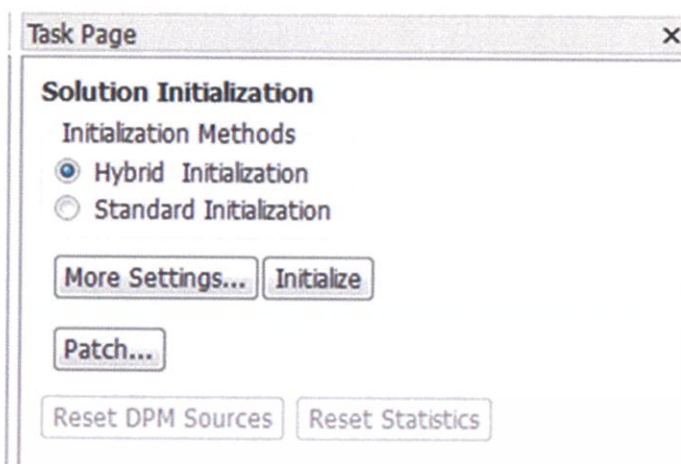
รูปที่ 4.13 กำหนดค่าใน Reference values



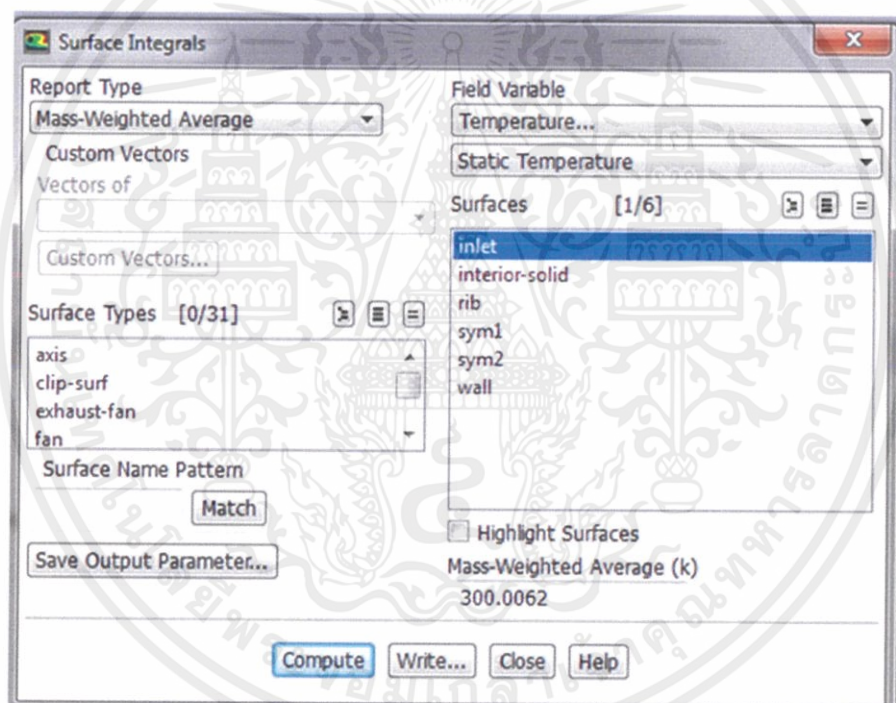
รูปที่ 4.14 การตั้งค่า Solution Methods รูปที่ 4.15 แสดงการปรับค่า Solution Controls



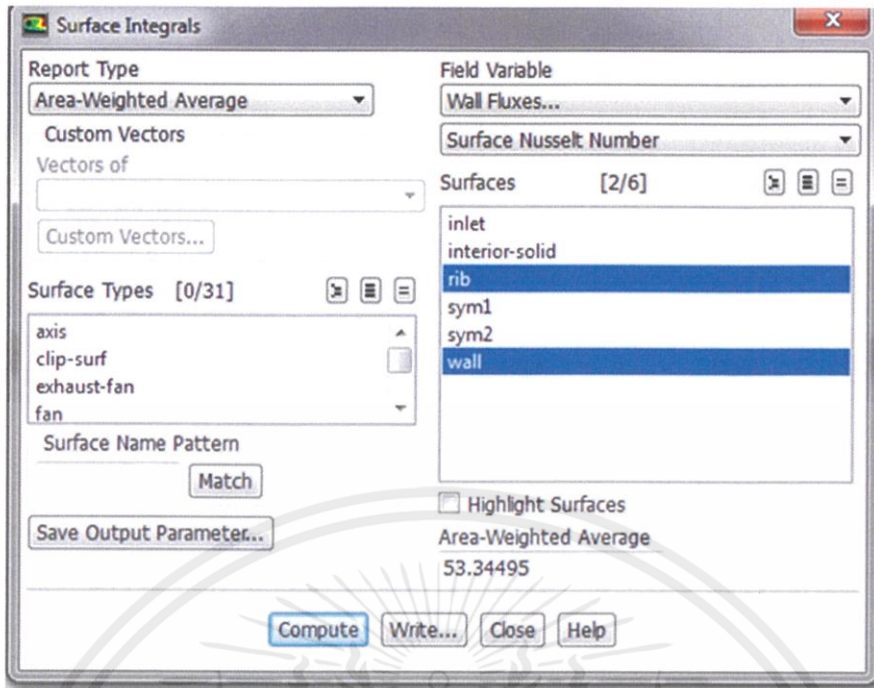
รูปที่ 4.16 แสดงการกำหนดค่าใน Monitors



รูปที่ 4.17 การกำหนดค่าเริ่มต้น



รูปที่ 4.18 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิ

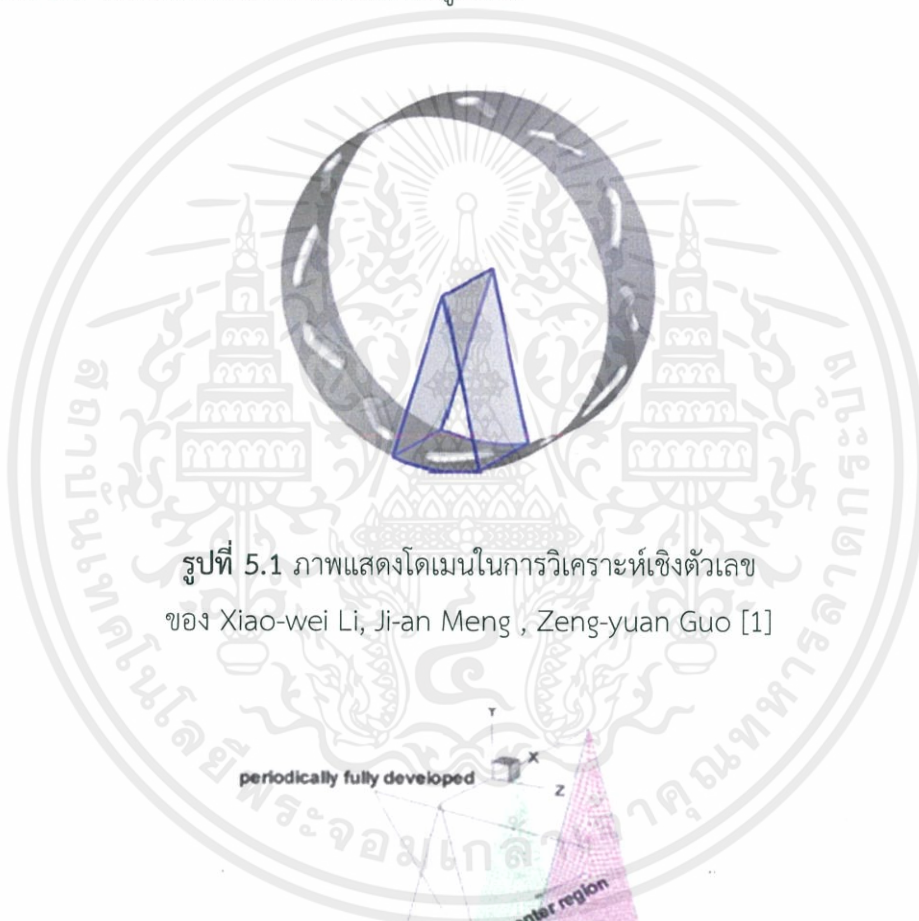


รูปที่ 4.19 แสดงผลการคำนวณ Nusselt

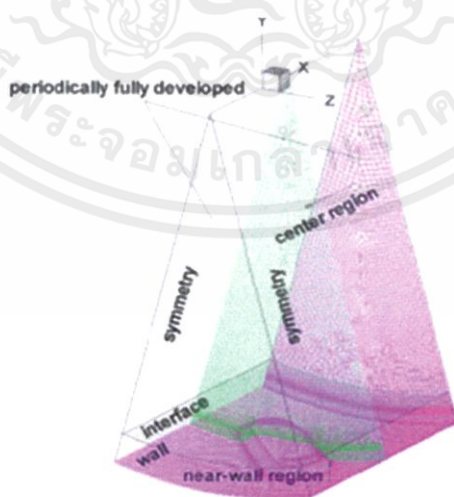
ผลการศึกษา และการอภิปรายผลการศึกษา

5.1 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองตัวเลข

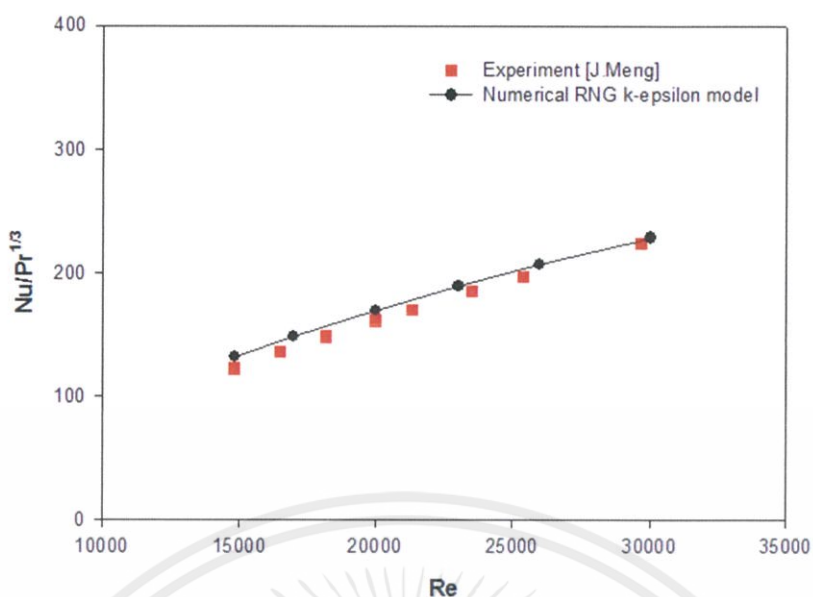
เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดลองมีความถูกต้องแม่นยำ โดยเลือกเปรียบเทียบผลกับแบบทดลองในงานวิจัยของ Xiao-wei Li, Ji-an Meng , Zeng-yuan Guo [1] โดยเป็นลักษณะท่อแบบกตริรูปตัววี



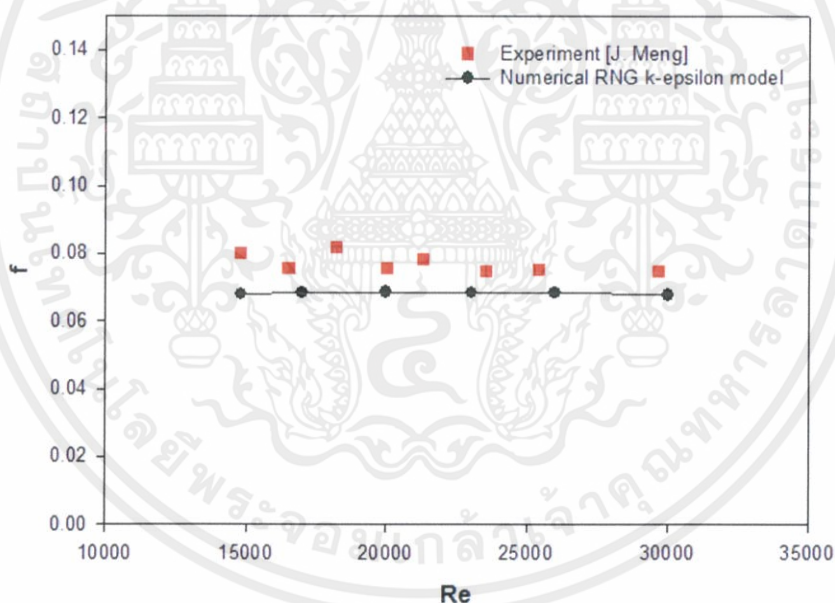
รูปที่ 5.1 ภาพแสดงโดเมนในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข
ของ Xiao-wei Li, Ji-an Meng , Zeng-yuan Guo [1]



รูปที่ 5.2 ภาพแสดงโมเดลในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข
ของ Xiao-wei Li, Ji-an Meng , Zeng-yuan Guo [1]



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรโนลด์กับเลขนึลเชิลท์จากแบบจำลอง RNG k- ϵ และผลการทดลองของ X.W .Li,J.A. Meng และZ.Y. Guo [1]



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรโนลด์กับตัวประกอบความเสียดทานจากแบบจำลอง RNG k- ϵ และผลการทดลองของ X.W .Li,J.A. Meng และZ.Y. Guo [1]

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ข้างต้น จะพบว่าการใช้ Turbulent model แบบ RNG k-epsilon model จะให้ค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มเดียวกับค่าผลการทดลองและมีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ดังนั้นแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้จึงเหมาะสมกับการนำไปทดลองเชิงตัวเลขในขั้นตอนต่อไปได้

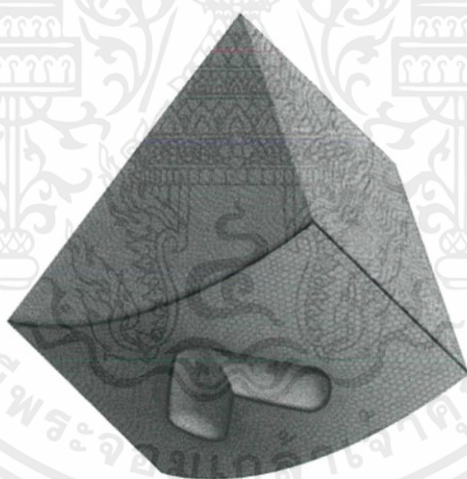
5.2 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม

พิจารณาการไหลแบบเป็นคาบ โดยการคำนวณการไหลในช่วงการพัฒนาย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง หรือการคำนวณแบบเป็นโมดูล มีโดเมนการไหลแบบสมมาตร (symmetry planes) และเป็นการแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ

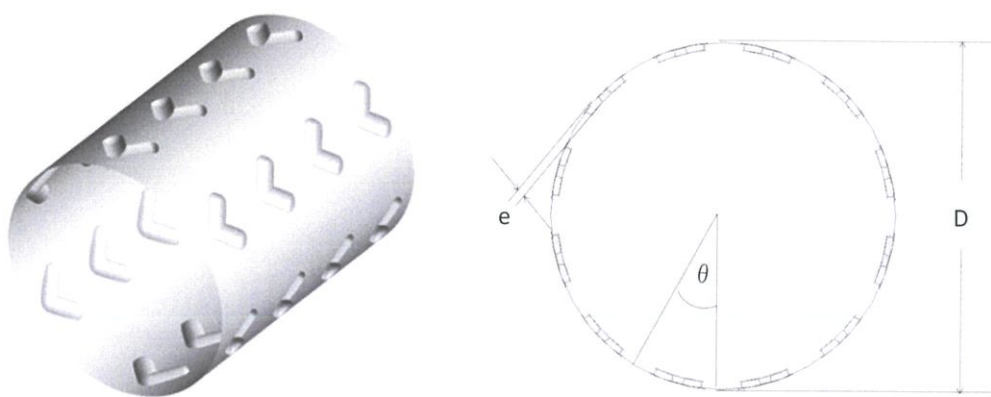
การหาผลกระทบของจำนวนกริดที่มีผลต่อคำตอบ ได้ศึกษาจำนวนกริดที่แตกต่างกันที่ 109872, 199751, 298231 และ 400588 เงื่อนไขการรู้เข้าหาคำตอบของทุกค่าอยู่ที่ 10^{-5} ยกเว้นสมการพลังงาน 10^{-9}

ตาราง 5.1 Grid Independent ที่ Re 8000

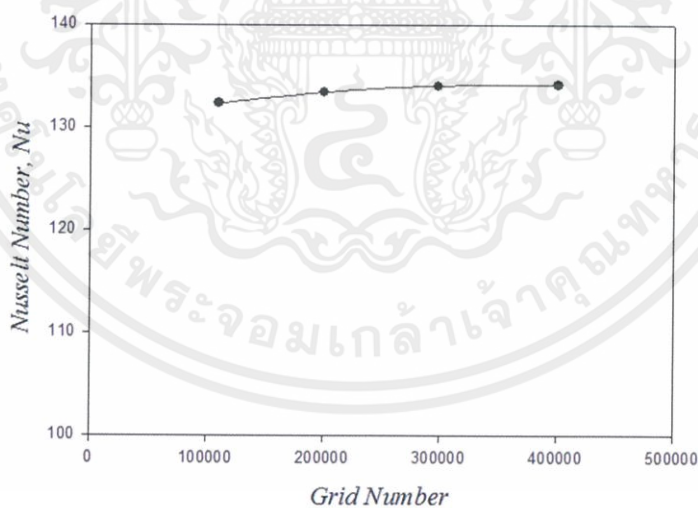
GridNumber	Nu	f
109,872	132.3463	0.058012
199,751	133.4455	0.058997
298,231	134.0857	0.059505
400,588	134.1234	0.059975



รูปที่ 5.5 ภาพแสดงลักษณะของกริดในโดเมนที่ใช้ในการศึกษาเชิงตัวเลข



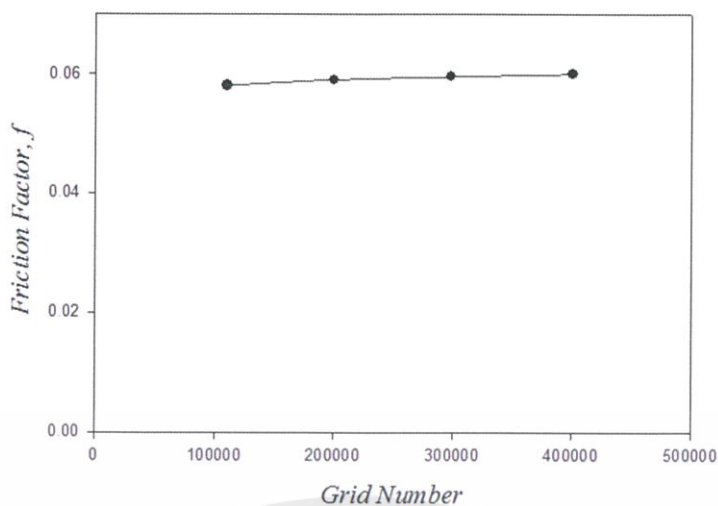
รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะท่อและครีบกาว



รูปที่ 5.7 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า Nu ที่ $Re=8,000$

จากรูปที่ 5.7 เห็นได้ว่าจำนวนกริดที่แตกต่างกันให้ค่าเฉลี่ยวัดที่ต่างกันโดยเมื่อใช้จำนวนกริด 199,751 จะมีค่าคลาดเคลื่อน 0.83% ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มจำนวน กริดขึ้นเป็น 298,231 เมื่อเทียบกับจำนวนกริดที่ 199,751 พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 0.47% ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า f ที่ $Re=8,000$

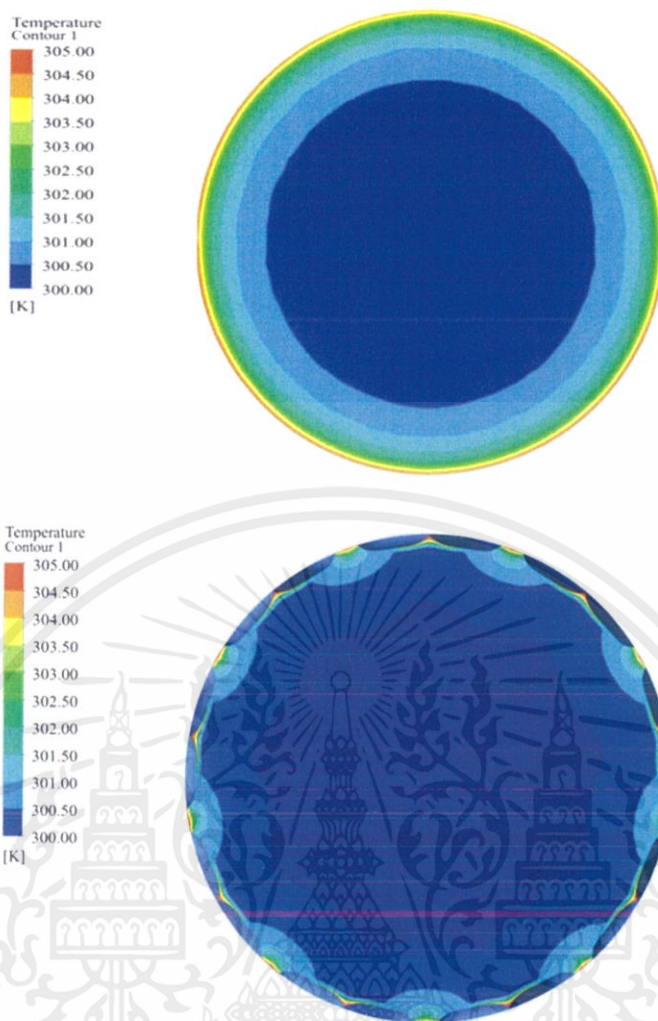
จากรูปที่ 5.8 เห็นได้ว่าจำนวนกริดที่แตกต่างกันให้ ตัวประกอบความเสียหายที่ต่างกันโดยเมื่อใช้จำนวน กริด 199,751 จะมีค่าคลาดเคลื่อน 1.69% ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มจำนวนกริดขึ้นเป็น 298,231 เมื่อเทียบกับจำนวนกริดที่ 199,751 พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 0.86% ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

เมื่อพิจารณาค่าน้ำเชลท์และตัวประกอบความเสียหายจากจำนวนกริดต่างๆจะพบว่าค่าจำนวนกริดที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 298,231 เนื่องจากให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้และเป็น การลดภาระและระยะเวลาการคำนวณให้น้อยลง

5.3 ลักษณะพฤติกรรมของของไหลในท่อ

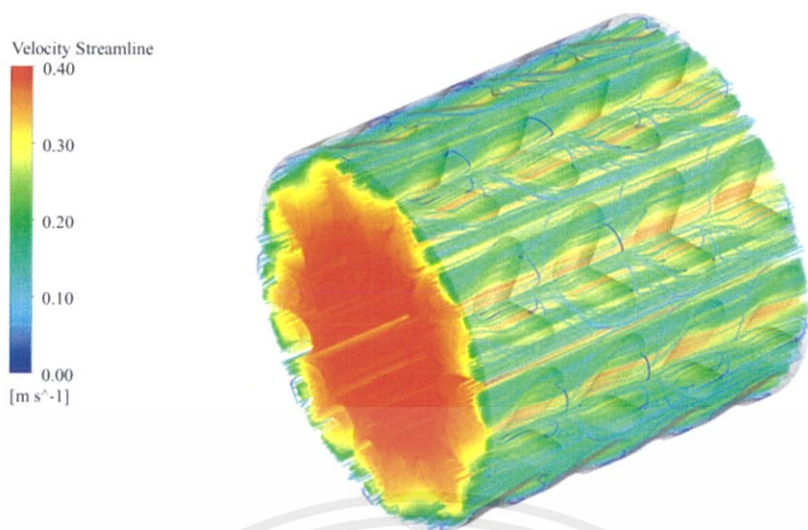


รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อที่ทางเข้า, บริเวณกลางท่อของโดเมนและทางออก ตามลำดับ



รูปที่ 5.10 แสดงแผนภาพอุณหภูมิของท่อเรียบและท่อที่มีการก่ดขึ้นครีบทวี

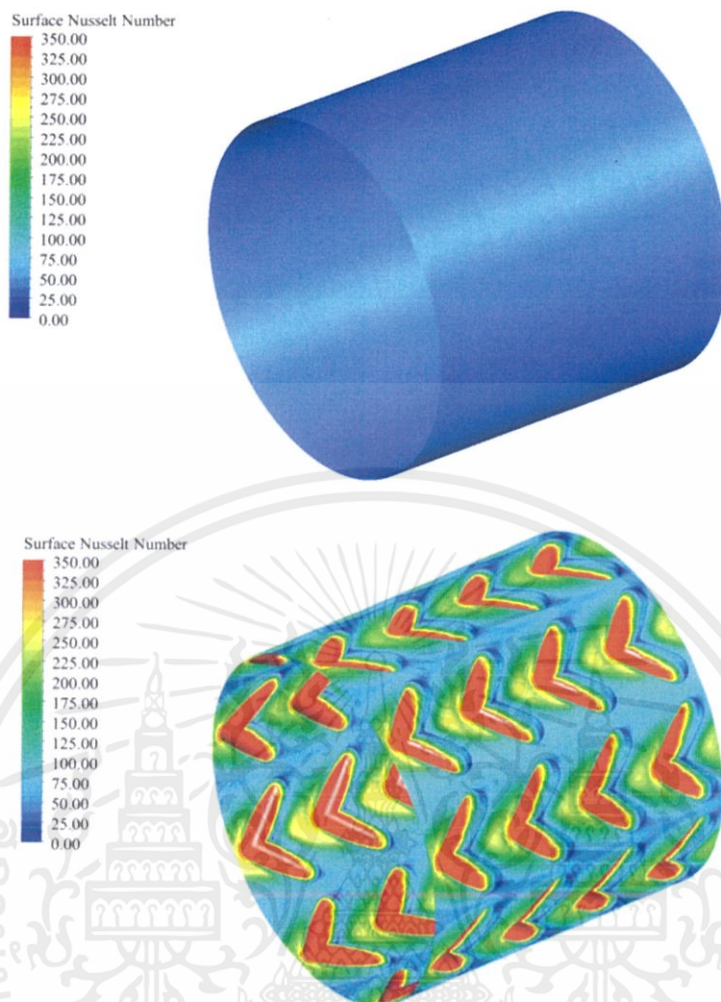
จากภาพแสดงแผนภาพอุณหภูมิภายในท่อที่มีการก่ดรูปครีบทวี จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของของไหลเย็นมีบริเวณกว้างขึ้น กล่าวคือมีการถ่ายเทความร้อนที่มากขึ้น ซึ่งเกิดจากกระแสไหลวนนำของไหลเกิดการผสมระหว่างบริเวณที่ร้อนและเย็นมากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 5.11 แสดงกระแสการไหลภายในท่อที่มีการกดขึ้นครึ่งตัววี

จากรูปที่แสดงจะพบว่าเส้นกระแสการไหลเมื่อมีการกดครึ่งรูปตัววี เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลแบบสามมิติภายในท่อ จะเห็นว่ามีการไหลวนจำนวนเก้าคู่ตามลักษณะการกดขึ้นครึ่งรูปตัววีจำนวนเก้าครึ่ง

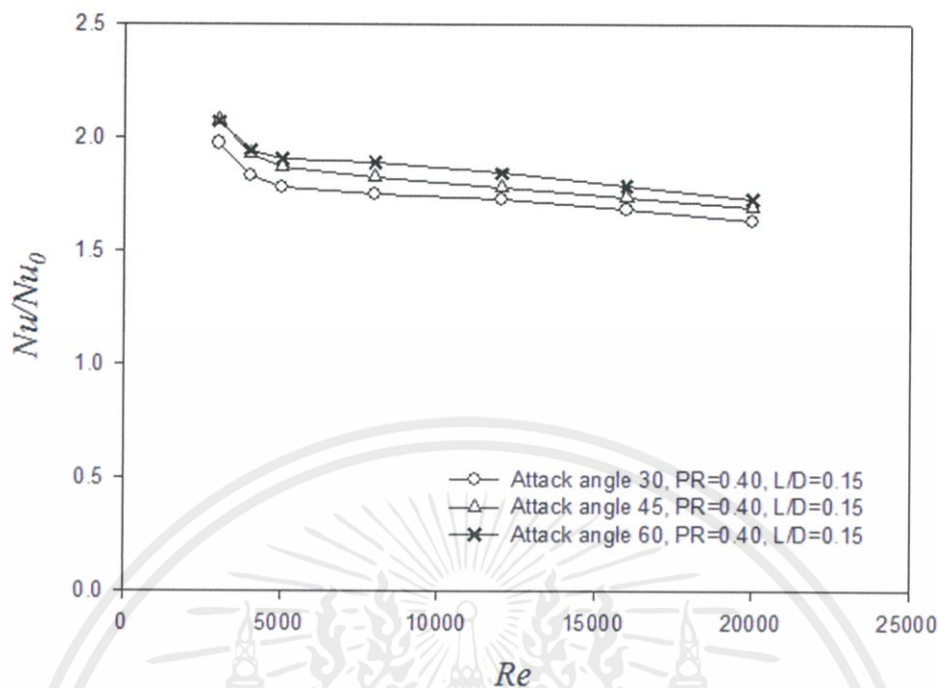




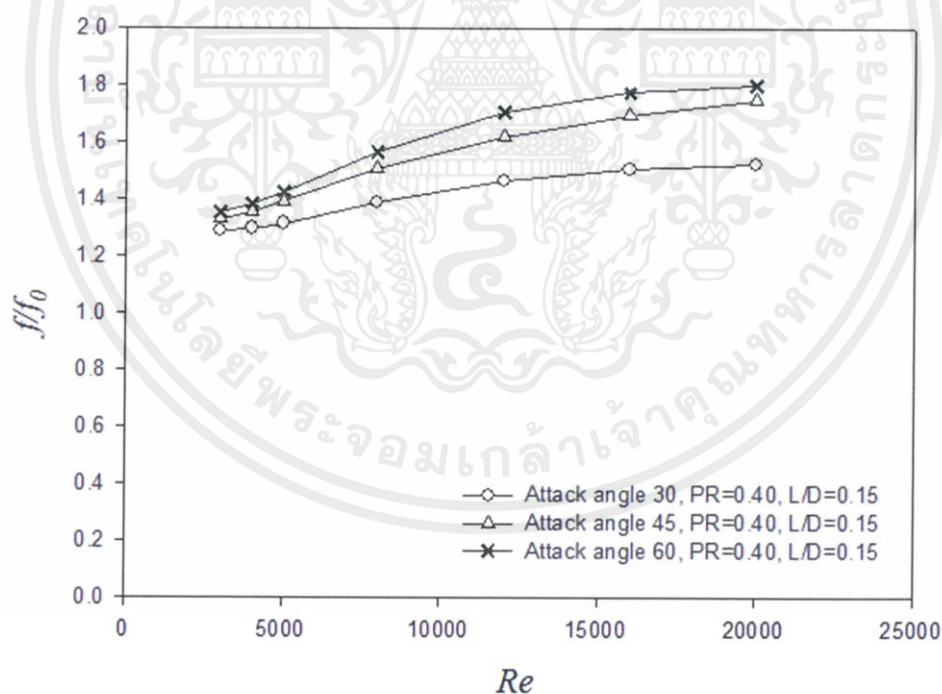
รูปที่ 5.12 แผนภาพแสดงค่าตัวเลขที่บนผนังท่อเรียบ
และท่อที่มีการก่ดครีรูปตัววีจำนวน 9 คู่

จากรูปที่ 5.12 จะพบว่าค่าตัวเลขของท่อกลมที่มีการก่ดขึ้นรูปครีวีมีค่าสูงมากกว่าค่าตัวเลขของท่อเปล่าโดยสังเกตเห็นได้ว่าบริเวณที่มีการก่ดขึ้นรูปครีวีจะมีค่าตัวเลขที่สูงกว่าบริเวณอื่น กล่าวคือจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณครีมากกว่าบริเวณอื่นนั่นเอง

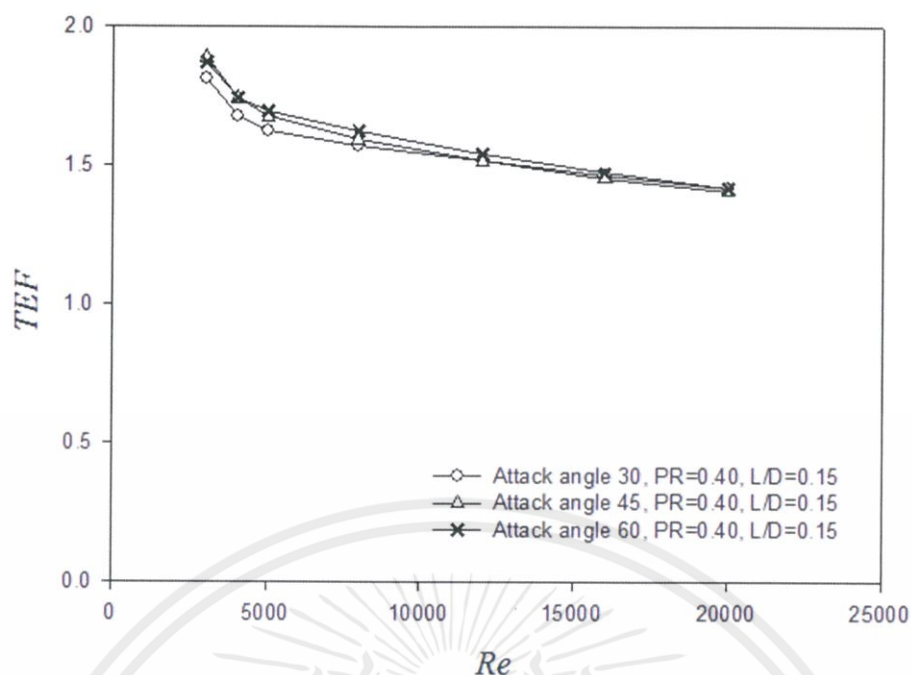
5.4 อิทธิพลของมุมปะทะ



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัลเซิลท์ในการแสดงอิทธิพลมุมปะทะ



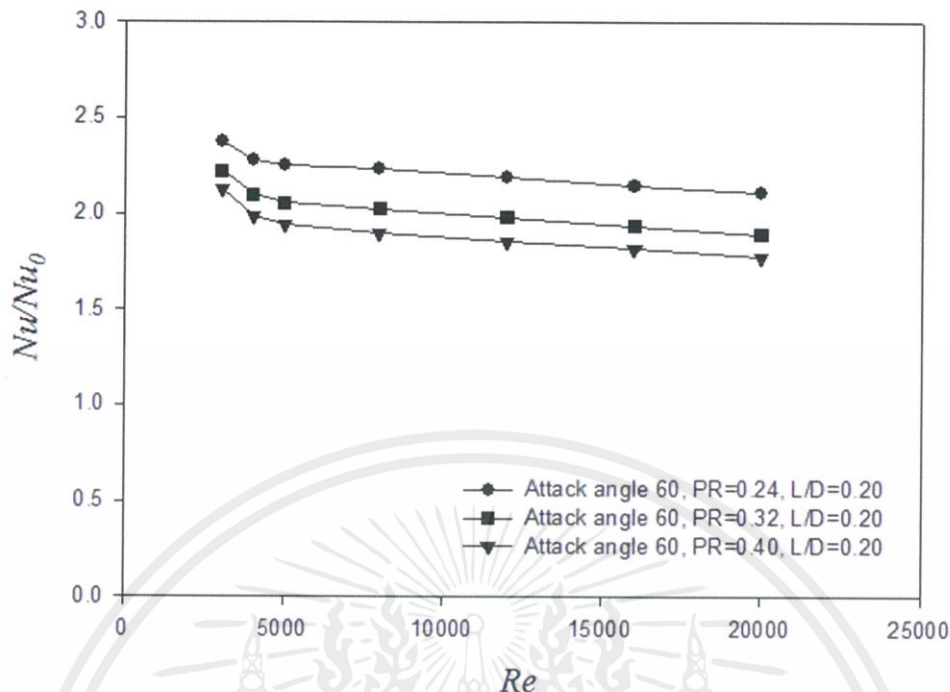
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพลมุมปะทะ



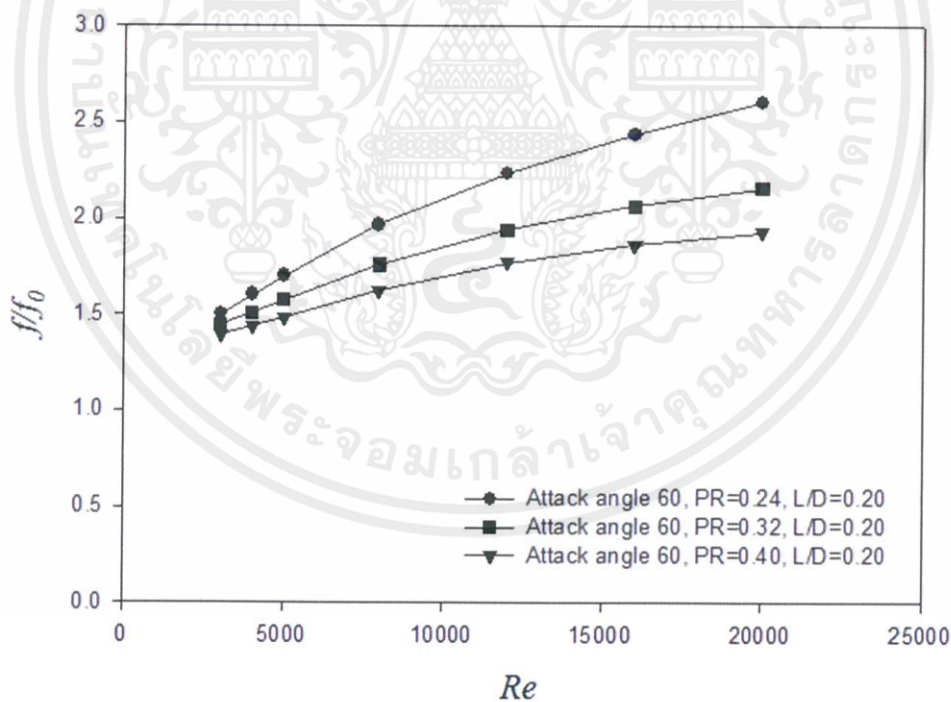
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพลมุมปะทะ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ 5.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มมุมปะทะมากขึ้นจะทำให้เลขนัลเชิลท์เพิ่มขึ้น และ 5.14 ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนเพิ่มขึ้นตามมาเมื่อเพิ่มมุมปะทะดังที่แสดงในกราฟ 5.15

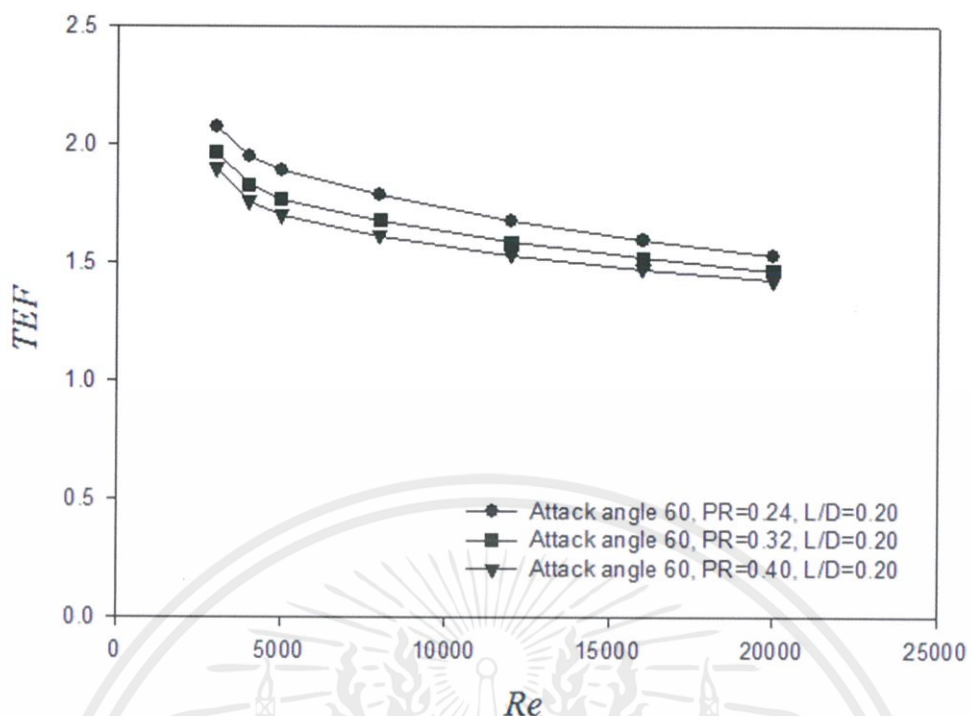
5.5 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างระยะห่างครีบอกกับความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลท์ในการแสดงอิทธิพล PR



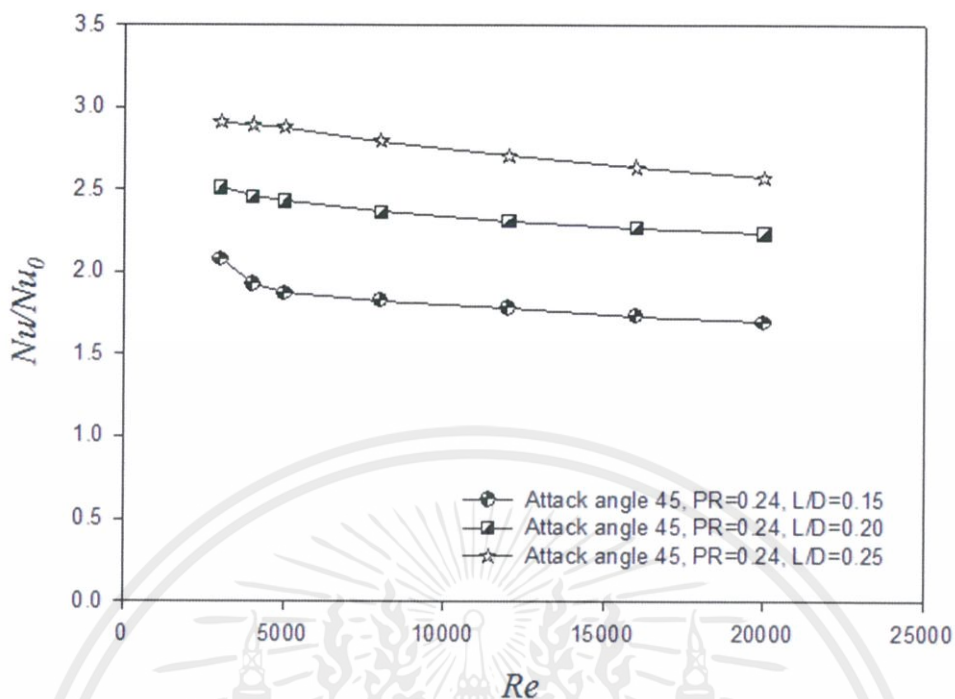
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพล PR



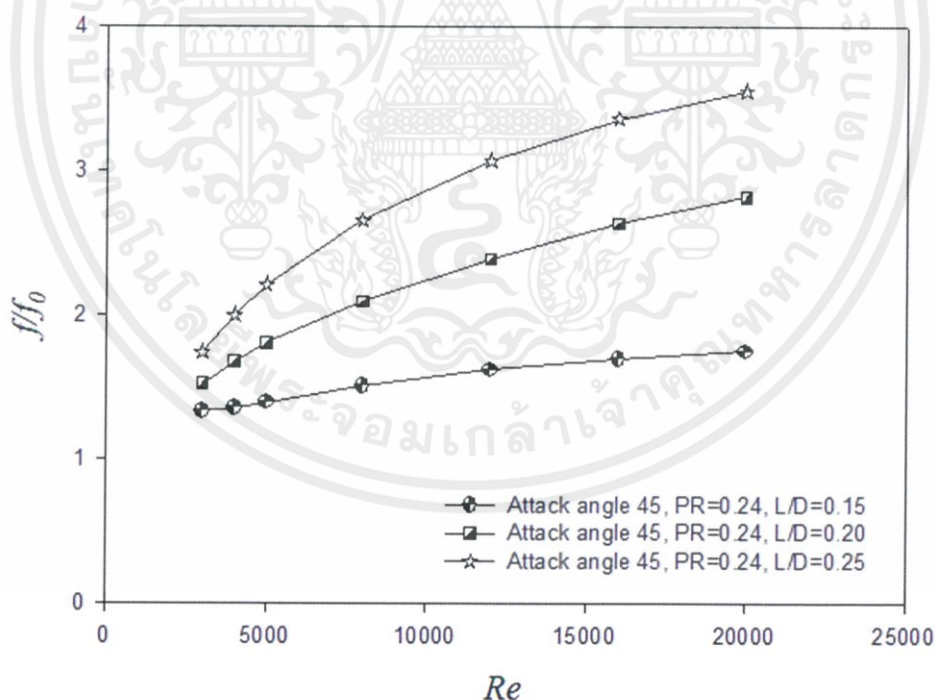
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพล PR

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ 5.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อ PR มากขึ้นจะทำให้เลขนิตเซลล์ลดลง และ 5.17 ค่าตัวประกอบเสียดทานก็มีค่าลดลงเมื่อ PR เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนลดลงเมื่อเพิ่ม PR ดังที่แสดงในกราฟ 5.18

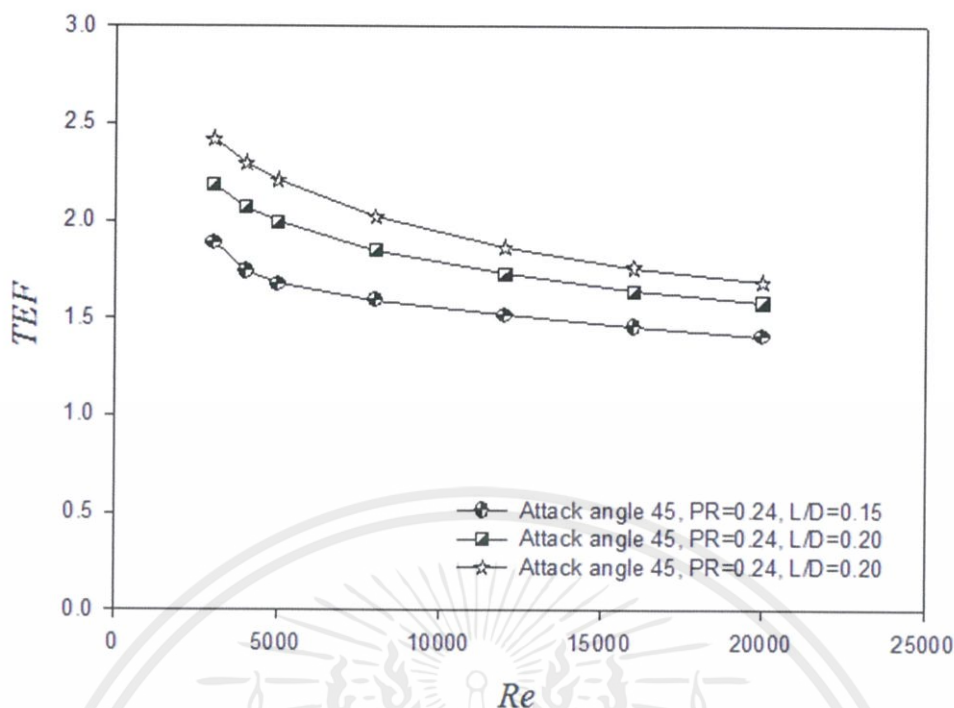
5.6 อิทธิพลของมุมอัตราส่วนระหว่างความยาวครีบอกต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนลเซลล์ในการแสดงอิทธิพลของ L/D



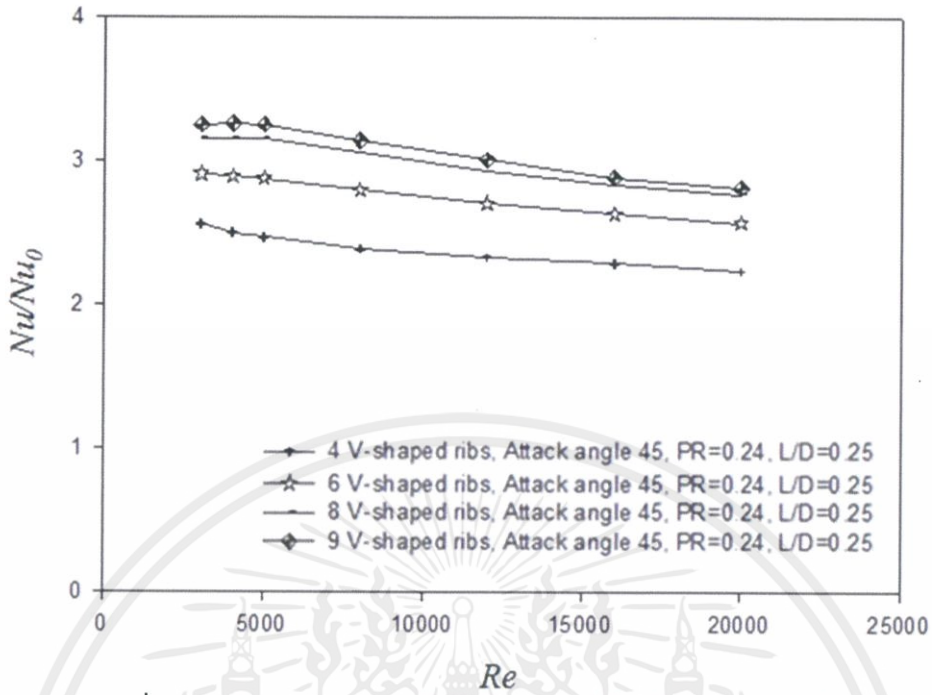
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการแสดงอิทธิพลของ L/D



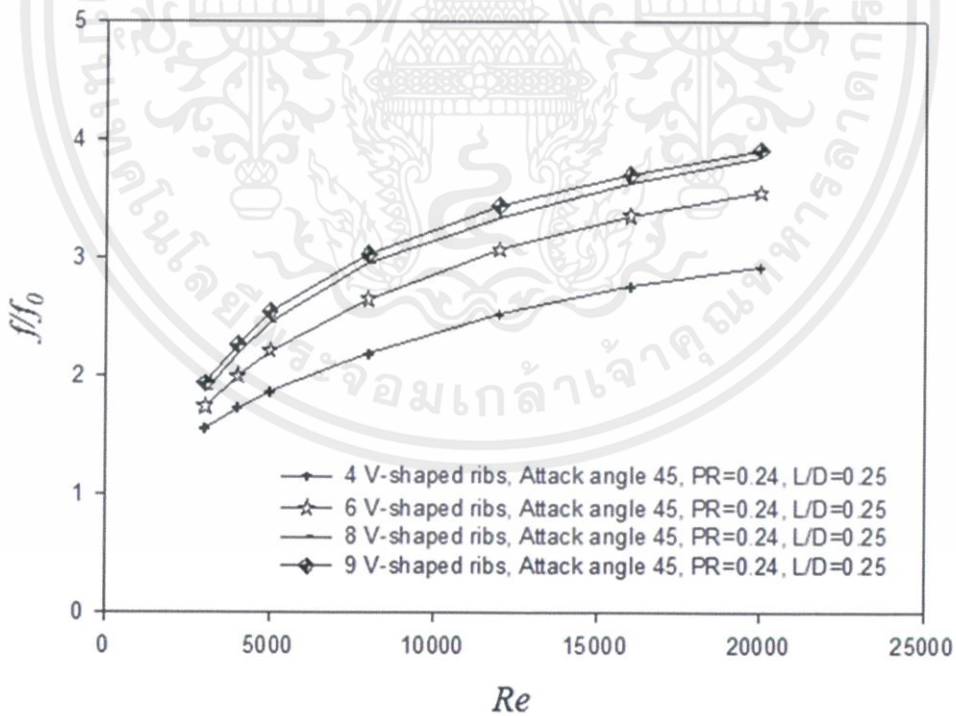
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพลของ L/D

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ 5.19 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความยาวรอยกตมากขึ้นจะทำให้เลขนัลเชิลท์เพิ่มขึ้น และ 5.20 ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวรอยกตเพิ่มขึ้นเช่นกันซึ่งส่งผลให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความยาวรอยกต ดังที่แสดงในกราฟ 5.21

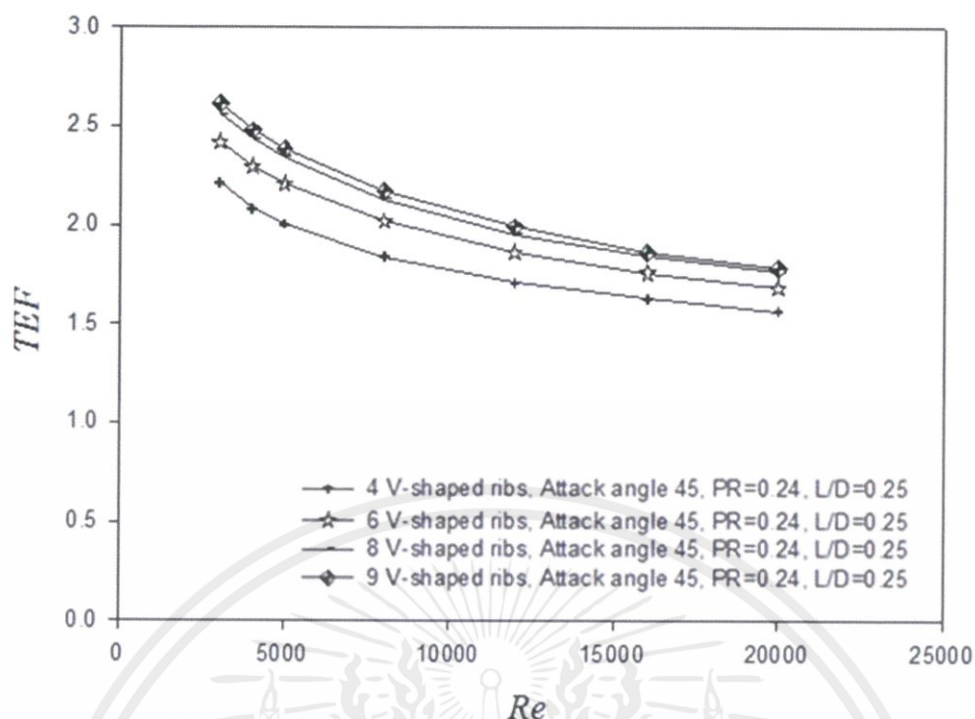
5.7 อิทธิพลของจำนวนครีบ



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนัสเซลท์
ในการแสดงอิทธิพลของจำนวนครีบ



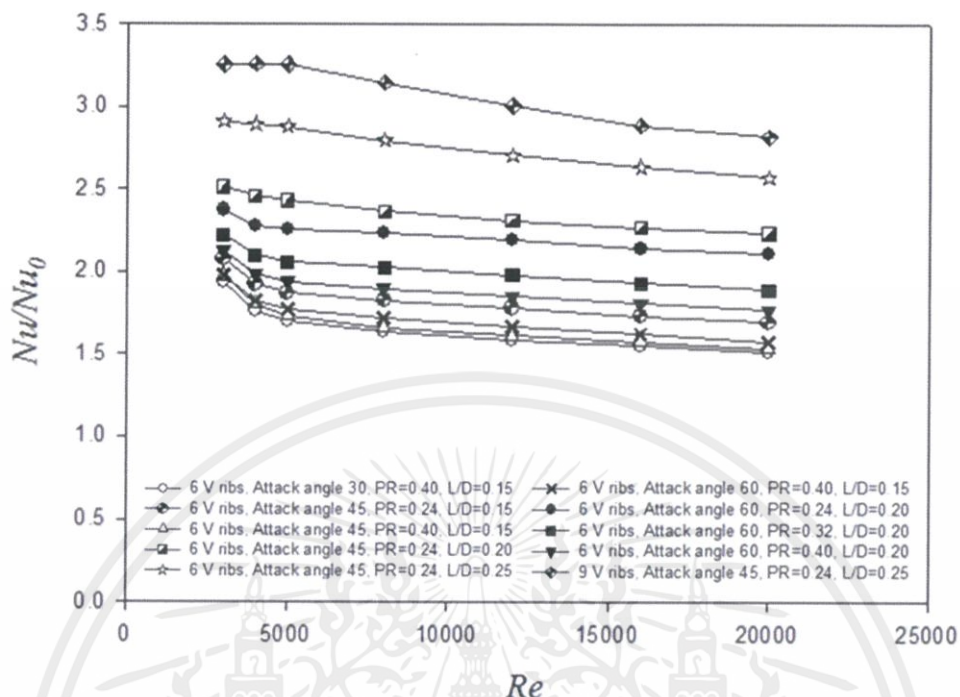
รูปที่ 5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทาน
ในการแสดงอิทธิพลของจำนวนครีบ



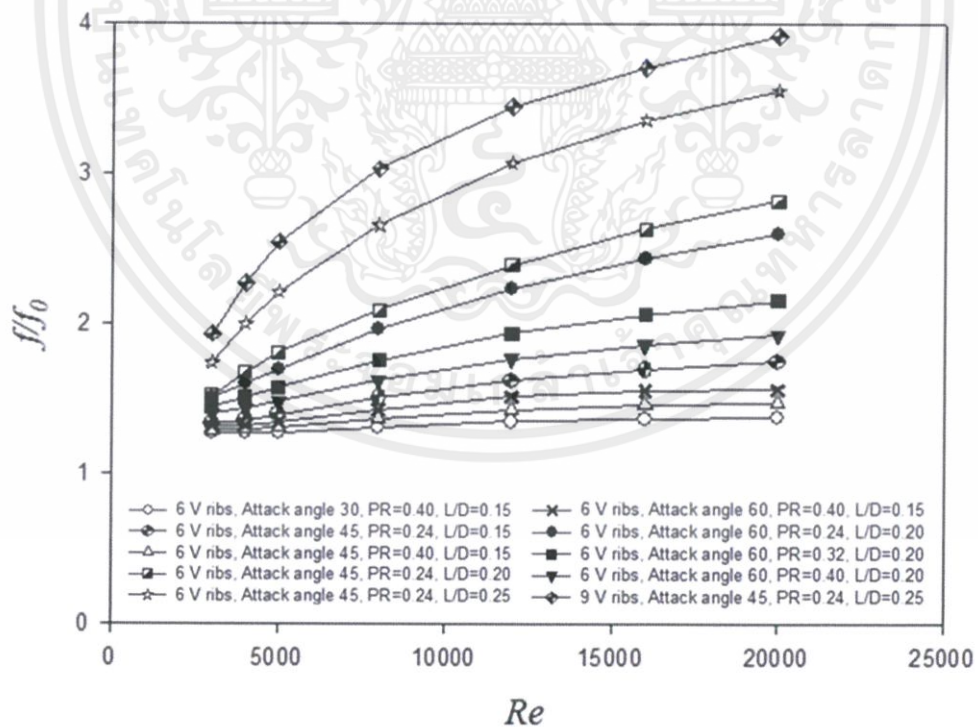
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ในการแสดงอิทธิพลของจำนวนครีบ

จากกราฟจะพบว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนครีบจะมีผลต่อค่านิลเซิลท์ ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน โดยเมื่อจำนวนครีบที่ทำการกุดเพิ่มมากขึ้น ค่านิลเซิลท์ ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เช่นกันดังที่แสดงในกราฟ 5.22 5.23 และ 5.24

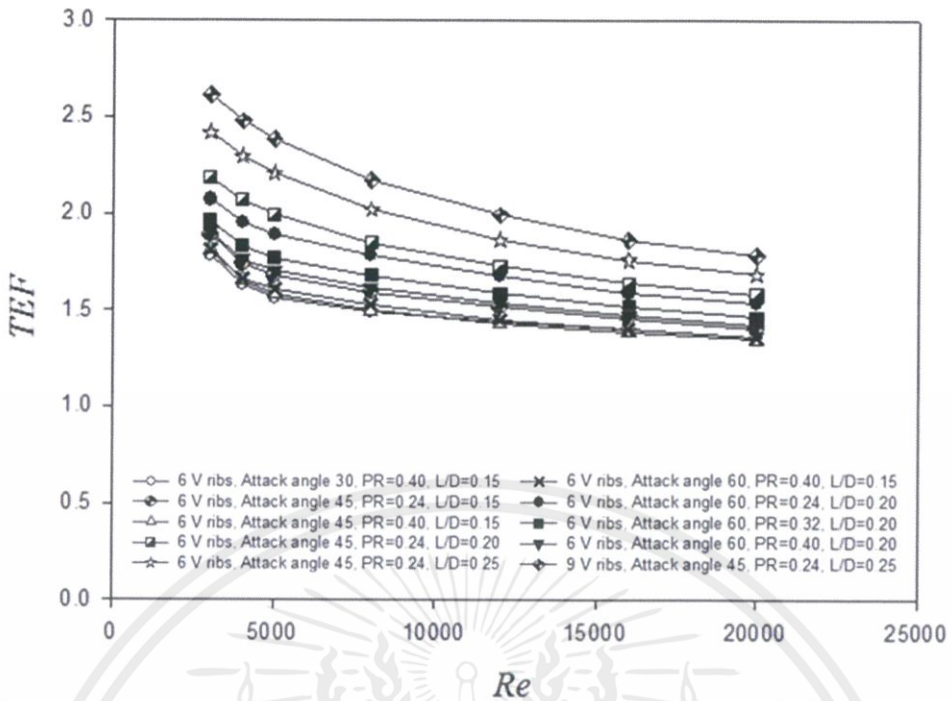
5.8 อภิปรายผลการศึกษา



รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับเลขนลเซลล์ในการอภิปรายผลการศึกษา



รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับตัวประกอบเสียดทานในการอภิปรายผลการศึกษา



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรโนลด์กับค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนในการอภิปรายผลการศึกษา

จากการศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะ PR และความยาวรอยกุด จะพบว่ามุมปะทะและความยาวรอยกุดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่านิลเซิลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่ม PR จะทำให้ค่านิลเซิลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลง ซึ่งค่านิลเซิลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานใช้ในการคำนวณหาตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน ดังนั้นเมื่อมุมปะทะและความยาวรอยกุดที่เพิ่มมากขึ้น แต่ PR ลดลงจะทำให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อน มีค่าเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนจะมีค่ามากที่สุดที่มุมปะทะ 45 องศา PR น้อยที่สุด และความยาวรอยกุดมากที่สุด

จากการศึกษาเชิงตัวเลขนี้ จะพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดและให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนที่มากที่สุดที่ 2.61 โดยมีการกุดขึ้นครีบจำนวน 9 ครีบ มุมปะทะ 45 องศา PR=0.24 และ L/D=0.25 ที่เลขเรโนลด์ 3000

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

อิทธิพลของมุมปะทะ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มมุมปะทะขึ้น จะทำให้ค่านัลเชิลท์มีแนวโน้มมีค่ามากขึ้น แต่ก็ทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีความเพิ่มมากขึ้นอย่างมากเช่นกัน จึงส่งผลให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนต่ำ ซึ่งจากการทดลองนี้กรณีมุมปะทะ 45 องศา จะให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนสูงสุด

อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีบต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (PR) จะพบว่าเมื่อเพิ่ม PR จะทำให้ค่านัลเชิลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานลดลง ส่งผลให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนต่ำ ซึ่งจากการทดลองนี้กรณี PR=0.24 จะให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนสูงสุด

อัตราส่วนระหว่างความยาวของครีบต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (L/D) จากผลการศึกษาเชิงตัวเลขจะพบว่าเมื่อเพิ่มค่า L/D จะทำให้ค่านัลเชิลท์เพิ่มมากขึ้น แต่ค่าตัวประกอบเสียดทานก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจากการทดลองนี้กรณี L/D=0.25 จะให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนสูงสุด

จากผลการศึกษาเชิงตัวเลขนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดและให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนที่มากที่สุดที่ 2.61 โดยมีการก่อกวนครีบตัววีจำนวน 9 ครีบ มุมปะทะ 45 องศา PR=0.24 และ L/D=0.25 ที่เลขเรโนลด์ 3000

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองจะพบว่าจะสามารถพัฒนารูปแบบการก่อกวนครีบได้อีกหลายแนวทาง เช่น การปรับมุมปะทะ อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีบต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (PR) อัตราส่วนระหว่างความยาวของครีบต่อความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (L/D) และอัตราส่วนการบล็อก (BR) เป็นต้น เพื่อให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดและได้ค่าตัวประกอบการเพิ่มขึ้นทางความร้อนที่สูงที่สุด

เนื่องจากการทำการจำลองนั้นผลที่ได้ไม่อาจทราบล่วงหน้าได้ ดังนั้นในการศึกษาควรจะปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ อย่างละเอียด มีระบบแบบแผน เพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่สุดในการศึกษา