

การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมโดยใช้เทอร์ปีวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Enhancement of heat transfer performance in a circular tube utilizing various types of
turbulators

Mr. Chotitach Jitbamrung



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมโดยใช้เทอร์โมอิเล็กโตรรูปแบบต่างๆ
โดย	นายโชติชัย จิตรบำรุง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศนุวัฒน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ชญานุตม์ โฆษิตานนท์)

โชติธัช จิตรบำรุง : การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมโดยใช้เทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ (Enhancement of heat transfer performance in a circular tube utilizing various types of turbulators) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ศ. ดร. สุทธิชัย อัสสะบารุณรัตน์, 144 หน้า.

งานวิจัยนี้เสนอการใช้เทอร์บิวเลเตอร์ชนิดเพื่องรูปแบบใหม่เพื่อปรับปรุงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม การศึกษาใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT VERSION 15.0 โดยใช้แบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ จำลองการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ ได้แก่ แบบวงแหวนวงกลม แบบวงแหวนกรวย และแบบวงแหวนเฟืองซึ่งเป็นการตัดบางส่วนออกจากเทอร์บิวเลเตอร์แบบวงแหวนกรวย ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของท่อที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์แบบต่างๆ โดยมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 และอัตราส่วนระยะห่างเท่ากับ 4 และ 8 กำหนดให้อากาศไหลผ่านท่อทดสอบที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ระหว่าง 4000 – 20000 และให้ค่าพลังค์ความร้อนคงที่ พบว่าผลการคำนวณที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มมีความใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง

จากการศึกษาพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์แบบวงแหวนวงกลมและแบบวงแหวนกรวยเพิ่มขึ้น 87% ถึง 199% เมื่อเปรียบเทียบกับท่อแบบผิวเรียบ ในกรณีของเทอร์บิวเลเตอร์แบบวงแหวนกรวยเพิ่มขึ้น 3% ถึง 8% เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์บิวเลเตอร์แบบวงแหวนวงกลม และพบว่าเทอร์บิวเลเตอร์แบบวงแหวนเฟืองให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าเทอร์บิวเลเตอร์ที่ติดตั้งด้วยอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดเท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนระยะห่างที่สั้นที่สุดเท่ากับ 4 ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุด

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5770151621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: HEAT TRANSFER / FINITE VOLUME METHOD / TURBULATOR

CHOTITACH JITBAMRUNG: Enhancement of heat transfer performance in a circular tube utilizing various types of turbulators. ADVISOR: ASST. PROF. SOMPONG PUTIVISUTISAK, Ph.D., CO-ADVISOR: PROF. SUTTICHAH ASSABUMRUNGRAT, Ph.D., 144 pp.

This paper proposes a novel Gear-type turbulator for improvement of heat transfer performance in a circular tube. A commercial software ANSYS FLUENT VERSION 15.0 with a standard $k-\varepsilon$ model is used to simulate the turbulent flow in a circular tube fitted with different types of turbulator, including circular-ring turbulator (CRT), conical-ring turbulator (CORT) and gear-ring turbulator (GRT) by partial cutting out of CORT. The study considered the circular tube fitted with turbulators with different diameter ratios (DR = 0.5, 0.6 and 0.7), and pitch ratios (PR = 4 and 8). The air feed temperature was specified at 27 degree Celsius with a Reynolds number range of 4000 to 20000. The heat flux was constant. The simulation results obtained from the finite volume method agree well with the experimental results reported in the literature.

From the studies, the heat transfer rates in the tube fitted with CRTs and CORTs are 87% to 199% higher than that of the plain tube without a turbulator. The CORTs about 3% to 8% higher than the CRTs. The highest heat transfer performance was found in the case of GRT. Moreover, it was found that the turbulator with the smallest diameter ratio (DR = 0.5) and the pitch ratio (PR = 4) offers the highest heat transfer rate.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำอย่างดียิ่งของ ผศ. ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ศ. ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านทั้งสองได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนคำปรึกษา อีกทั้งยังให้กำลังใจและช่วยผลักดันผู้วิจัยทั้งในเรื่องงานวิจัยและการดำเนินชีวิต

กราบขอบพระคุณ รศ. ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ ประธานกรรมการ รศ. ดร. บุญชัย เลิศนุวัฒน์ และ ดร. ชญานุตม์ โฆษิตานนท์ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัย ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณพี่ศิวพล นิตยสุทธิ และเพื่อนๆ สมาชิกทุกท่านในห้องปฏิบัติการ Computational Modeling and Optimisation Laboratory รวมไปถึงเพื่อนๆปริญญาโททุกท่าน สำหรับคำแนะนำ ความช่วยเหลือ และข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยนี้

สุดท้ายผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว อันเป็นที่รักที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา จนผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยสำเร็จได้อย่างที่ตั้งใจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ค
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.1.1 เทอร์บิวเลเตอร์ (Turbulators).....	4
1.1.1.1 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม Circular-ring turbulators (CRT).....	5
1.1.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเทอร์บิวเลเตอร์.....	6
1.1.2.1 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย Conical-ring turbulators (CORT).....	6
1.1.2.2 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง Gear-ring turbulators (GRT).....	8
1.2 การศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	9
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	23
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	23
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	24
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	24
บทที่ 2 ทฤษฎีและสมการพื้นฐานของการไหล.....	25
2.1 การไหลภายในท่อ.....	25
2.2 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน.....	27

2.2.1	สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation).....	28
2.2.2	สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation).....	28
2.2.3	สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation).....	30
2.3	แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Modeling).....	30
2.5	สรุปสมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน.....	35
บทที่ 3	ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม	37
3.1	บทนำ.....	37
3.2	สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equation).....	37
3.3	การกระจายพจน์สำหรับปัญหาการพาและการแพร่กระจาย.....	39
3.3.1	เทอมการพา (Convection term).....	41
3.3.2	เทอมการแพร่กระจาย (Diffusion term).....	42
3.3.3	Source term	43
3.4	การประมาณค่าโดยใช้แบบแผนเชิงตัวเลข	44
3.5	กระบวนการหาผลเฉลย.....	46
3.5.1	ระเบียบวิธี TDMA.....	46
3.5.2	ค่าผ่อนปรน.....	48
3.5.3	ระเบียบวิธี SIMPLE	49
บทที่ 4	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	55
4.1	การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์	55
4.1.1	การสร้างกริดของขอบเขตในการวิจัย (Grid generation)	56
4.1.2	การทดสอบ Grid independency	58
4.1.3	การกำหนดเงื่อนไขขอบของปัญหา (Boundary conditions)	59

4.1.3.1	เงื่อนไขขอบบริเวณทางเข้า.....	60
4.1.3.2	เงื่อนไขขอบบริเวณทางออก	60
4.1.3.3	เงื่อนไขขอบบริเวณผนังท่อ	60
4.2	การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลแบบปั่นป่วน และการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ กลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์.....	61
4.2.1	ค่าเฉลี่ยเลขคณิตเบอร์เนสลีย์ (Average Nusselt number, Nu).....	61
4.2.2	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor, f)	62
4.2.3	ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer performance, η).....	63
4.3	สรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม	70
บทที่ 5	ผลลัพธ์จากการคำนวณและการวิเคราะห์.....	71
5.1	ลักษณะของปัญหา.....	72
5.2	ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า DR และค่า PR	74
5.3	การถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์.....	83
5.4	ความดันตกคร่อมภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์.....	88
5.5	การเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนโดยการปรับปรุงรูปร่างของเทอร์บิวเล เตอร์	92
5.5.1	เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย Conical-ring turbulators (CORT).....	93
5.5.2	เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง Gear-ring turbulatos (GRT).....	103
5.6	ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์.....	115
5.6.1	ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม	116
5.6.2	ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย.....	117
5.6.3	ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง	118
5.7	การเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์.....	122
บทที่ 6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	135

ญ

หน้า

6.1 บทสรุป	135
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	137
รายการอ้างอิง.....	138
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	144



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	การเปรียบเทียบข้อมูลต่างๆ ของงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้หลักการ Passive technique ในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน	18
ตารางที่ 2.1	สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในรูปแบบของเทนเซอร์สำหรับแบบจำลอง	35
ตารางที่ 4.1	ตารางเปรียบเทียบรูปโครงสร้างของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กับขนาดของกริด (Grid number)	56
ตารางที่ 5.1	ข้อมูลต่างๆ ที่ใช้สำหรับการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ	72
ตารางที่ 5.2	ขนาดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับของไหลที่ไหลผ่านเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ	73
ตารางที่ 5.3	การเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT)	123
ตารางที่ 5.4	การเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT)	125
ตารางที่ 5.5	การเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) กรณีที่ค่า $N = 6$	127
ตารางที่ 5.6	การเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) กรณีที่ค่า $N = 8$	129
ตารางที่ 5.7	การเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) กรณีที่ค่า $N = 10$	131

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ [1].....	1
รูปที่ 1.2 การเปรียบเทียบการทำงานของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ [2]	
(ก) หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ	
(ข) หม้อไอน้ำแบบท่อไฟที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์.....	2
รูปที่ 1.3 การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ [2].....	3
รูปที่ 1.4 การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในเครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ลง [3]	3
รูปที่ 1.5 การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในท่อกลมโดยกำหนดให้ฟลักซ์ความร้อนคงที่	4
รูปที่ 1.6 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม Circular-ring turbulators (CRT)	
กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ [4]	
(ก) ด้านหน้าของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม	
(ข) ด้านข้างของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม.....	5
รูปที่ 1.7 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย Conical-ring turbulators (CORT)	
กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$	
(ก) ด้านหน้าของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย	
(ข) ด้านข้างของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย	7
รูปที่ 1.8 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง Gear-ring turbulators (GRT)	
กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ และ $N = 10$	
(ก) ด้านหน้าของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง	
(ข) ด้านข้างของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง.....	8
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงการแจกแจงความเร็วภายในท่อกลม (Velocity profile).....	26
รูปที่ 2.2 ลักษณะของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการไหลแบบปั่นป่วน	28
รูปที่ 3.1 การวางตัวของปริมาตรควบคุมในสามมิติ	41
รูปที่ 3.2 การเปรียบเทียบผลเฉลย ระหว่าง QUICK scheme และ Upwind scheme [30].....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.3 โดเมนการคำนวณ (Computational domain) ที่ใช้ระเบียบวิธี TDMA.....	47
รูปที่ 3.4 ระเบียบวิธี SIMPLE	54
รูปที่ 4.1 กริดที่ใช้ในการคำนวณสำหรับปัญหาในการไหล โดยมี Grid size เท่ากับ 3 มิลลิเมตร เท่าๆ กันในทุกมิติแต่ละเซลล์ (ก) ลักษณะของกริดบริเวณผนังภายนอกของท่อกลม (กริดรูปแบบสี่เหลี่ยม) (ข) ลักษณะของกริดบริเวณที่ของไหลไหลผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ภายในของท่อกลม (กริดรูปแบบสามเหลี่ยม).....	57
รูปที่ 4.2 การทดสอบ Grid independency ที่บริเวณทางเข้าและทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ สำหรับที่ $Re= 4,000$	59
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ต่างๆ กับค่าที่ได้จากสมการของ Dittus and Boelter [32] สำหรับท่อกลม ผิวเรียบ	65
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ค่าเรย์ โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ กับค่าที่ได้จากสมการของ Blasius [33] สำหรับท่อกลมผิวเรียบ	65
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ค่าเรย์ โนลด์นัมเบอร์กับผลการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4] สำหรับกรณีของ CRT ที่ค่า $DR = 0.5$, $PR = 4$ และ 8	66
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ค่าเรย์ โนลด์นัมเบอร์กับผลการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4] สำหรับกรณีของ CRT ที่ค่า $DR = 0.5$, $PR = 4$ และ 8	67
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์กับ ผลการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [5] สำหรับกรณีของ PCR และ GRT ที่ค่า $DR = 0.5$ และ $PR = 4$	68

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์กับผลการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [5] สำหรับกรณีของ PCR และ GRT ที่ค่า DR = 0.5 และ PR = 4.....	69
รูปที่ 5.1 ลักษณะของปัญหาสำหรับของไหลที่ไหลผ่านเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT).....	73
รูปที่ 5.2 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 4,000	75
รูปที่ 5.3 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000.....	75
รูปที่ 5.4 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.6, PR= 4 ที่ค่า Re = 4,000	76
รูปที่ 5.5 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.6, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000.....	76
รูปที่ 5.6 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.7, PR= 4 ที่ค่า Re = 4,000	77
รูปที่ 5.7 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.7, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000.....	77
รูปที่ 5.8 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 8 ที่ค่า Re = 4,000	78
รูปที่ 5.9 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 8 ที่ค่า Re = 20,000.....	78
รูปที่ 5.10 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.6, PR= 8 ที่ค่า Re = 4,000	79
รูปที่ 5.11 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.6, PR= 8 ที่ค่า Re = 20,000.....	79

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.12 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.7, PR= 8 ที่ค่า Re = 4,000	80
รูปที่ 5.13 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.7, PR= 8 ที่ค่า Re = 20,000	80
รูปที่ 5.14 รูปร่างพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000	82
รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลสแนมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT	83
รูปที่ 5.16 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 4,000	84
รูปที่ 5.17 ภาพขยายรูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR = 4 ที่ค่า Re = 4,000	85
รูปที่ 5.18 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 8,000	85
รูปที่ 5.19 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 12,000	86
รูปที่ 5.20 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 16,000	86
รูปที่ 5.21 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000	87
รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกคร่อมกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT	88
รูปที่ 5.23 รูปร่างความดันของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000	89

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.24 รูปร่างความดันของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) วงกลมกรณี DR = 0.5, PR= 8 ที่ค่า Re = 20,000.....	89
รูปที่ 5.25 รูปร่างความดันของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) วงกลมกรณี DR = 0.7, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000.....	90
รูปที่ 5.26 รูปร่างความดันของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) วงกลมกรณี DR = 0.7, PR= 8 ที่ค่า Re = 20,000.....	90
รูปที่ 5.27 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT.....	91
รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลสนิมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT กับท่อกลมผิวเรียบ.....	93
รูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลสนิมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT กับ CRT.....	94
รูปที่ 5.30 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 4,000.....	95
รูปที่ 5.31 ภาพขยายรูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 4,000.....	95
รูปที่ 5.32 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 8,000.....	96
รูปที่ 5.33 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 12,000.....	96
รูปที่ 5.34 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 16,000.....	97
รูปที่ 5.35 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000.....	97

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.36 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CORT	98
รูปที่ 5.37 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT กับ CORT	99
รูปที่ 5.38 เวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000	100
รูปที่ 5.39 ภาพขยายเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000	101
รูปที่ 5.40 ภาพขยายเส้นกระแสการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000	102
รูปที่ 5.41 ภาพขยายเส้นกระแสการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000	102
รูปที่ 5.42 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซลสันนัมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT	104
รูปที่ 5.43 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซลสันนัมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ กับท่อผิวเรียบ	105
รูปที่ 5.44 รูปร่างอุณหภูมิจากอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 และ N = 6 ที่ค่า Re = 4,000	106
รูปที่ 5.45 รูปร่างพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 และ N = 6 ที่ค่า Re = 4,000... ..	106
รูปที่ 5.46 ภาพขยายเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 และ N = 6 ที่ค่า Re = 4,000	107

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.47 รูปร่างอุณหภูมิจากอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์วงแหวนเพียง (GRT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ และ $N = 8$ ที่ค่า $Re = 4,000$	107
รูปที่ 5.48 ภาพขยายเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์วง แหวนเพียง (GRT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ และ $N = 8$ ที่ค่า $Re = 4,000$	108
รูปที่ 5.49 รูปร่างอุณหภูมิจากอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์วงแหวนเพียง (GRT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ และ $N = 10$ ที่ค่า $Re = 4,000$	108
รูปที่ 5.50 ภาพขยายเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์วง แหวนเพียง (GRT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ และ $N = 10$ ที่ค่า $Re = 4,000$	109
รูปที่ 5.51 ภาพขยายเส้นกระแสการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์วง แหวนเพียง (GRT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ และ $N = 10$ ที่ค่า $Re = 4,000$	110
รูปที่ 5.52 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัม เบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT	111
รูปที่ 5.53 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัม เบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT กับ CORT	112
รูปที่ 5.54 แสดงรูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์วงแหวน เพียง (GRT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 20,000$ และ $N = 6$	113
รูปที่ 5.55 ภาพขยายเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์วง แหวนเพียง (GRT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 20,000$ และ $N = 6$	114
รูปที่ 5.56 ภาพขยายเส้นกระแสการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์วง แหวนเพียง (GRT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 20,000$ และ $N = 6$	114
รูปที่ 5.57 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์ โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT	116
รูปที่ 5.58 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์ โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณี CORT	117

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.59 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์
โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT 118

รูปที่ 5.60 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์
โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT กรณีที่ค่า DR = 0.7 และ PR = 4. 119

รูปที่ 5.61 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์
โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์วงแหวนรูปแบบต่างๆ..... 120

รูปที่ 5.62 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์
โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์วงแหวนรูปแบบต่างๆ ใน
กรณีที่ค่า DR = 0.7 และ PR = 4..... 121

รูปที่ 5.63 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลสโน้มเบอร์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียด
ทานภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT 123

รูปที่ 5.64 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ
CRT 124

รูปที่ 5.65 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลสโน้มเบอร์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียด
ทานภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CORT 125

รูปที่ 5.66 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ
CORT 126

รูปที่ 5.67 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลสโน้มเบอร์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียด
ทานภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT (N = 6) 127

รูปที่ 5.68 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ
GRT กรณีที่ค่า N = 6 128

รูปที่ 5.69 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลสโน้มเบอร์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียด
ทานภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT (N = 8) 129

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.70 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT กรณีที่ค่า $N = 8$	130
รูปที่ 5.71 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าไนส์เซลสนัมเบอร์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียด ทานภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT ($N = 10$).....	131
รูปที่ 5.72 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT กรณีที่ค่า $N = 10$	132
รูปที่ 5.73 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเล เตอร์รูปแบบต่างๆ.....	133



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการพีชคณิต
A	พื้นที่หน้าตัดปริมาตรควบคุม
C	ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน
C_p	ค่าความจุ่มร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
D	การแพร่ของความปั่นป่วน, สัมประสิทธิ์การแพร่, เส้นผ่านศูนย์กลาง
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter)
d	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเทอร์บิวเลเตอร์
DR	อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter ratio)
f	แรงกระทำภายนอก, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
F	ฟลักซ์การพา
g	แรงโน้มถ่วง
H	ความสูงของช่องทางการไหล
h	ความสูงของเทอร์บิวเลเตอร์
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
L	ความยาวของช่องทางการไหล
L_e	ระยะทางช่วงขาเข้าของช่องทางการไหล
L_p	ระยะทางระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์ของช่องทางการไหล

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

N	จำนวนช่องที่ถูกตัดออก
Nu	ค่านัสเซลสตันัมเบอร์ (Nusselt number)
Pr	พรีนด์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl number)
P	ความดัน
PR	อัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio)
q''	ฟลักซ์ความร้อน
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)
S	Source term
T	อุณหภูมิ
u	ความเร็ว, ความเร็วในแนวแกน x
V	ปริมาตรควบคุม
v	ความเร็วในแนวแกน y
W	ความกว้างของเทอร์ปีวเลเตอร์
WR	อัตราส่วนความกว้าง (Width ratio)
WD	อัตราส่วนความกว้างของช่องที่ถูกตัด
w	ความเร็วในแนวแกน z

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

x	ระยะในแนวแกน x
y	ระยะในแนวแกน y
z	ระยะในแนวแกน z
ϕ	ตัวแปรสเกลาร์
$\bar{\phi}$	ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา
ϕ'	ค่าพารามิเตอร์ที่แทนผลของการสั่นที่ขึ้นกับเวลา
Γ	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)
μ	ความหนืดพลศาสตร์ (Dynamic viscosity)
l	Turbulent length scale
ω	Specific Dissipation rate
ε	Dissipation rate
μ_t	Turbulent viscosity
ρ	ความหนาแน่น
σ	ความเค้น
τ	ความเค้นเฉือน
ν	ความหนืดจลศาสตร์ (Kinematic viscosity)
κ	Von Karman constant
α	Under-relaxation

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ตัวห้อย (Subscripts)

B, F, E, W, N, S จุดที่อยู่ข้างเคียงตามทิศ northeast, southwest, east, west, north และ south

b, f, e, w, n, s ผิวของปริมาตรควบคุม

i, j, k indices

x ระยะในแนวแกน x

r ระยะในแนวรัศมี

θ ระยะในแนวมุมสัมผัส

nb จุดต่อที่อยู่ข้างเคียง

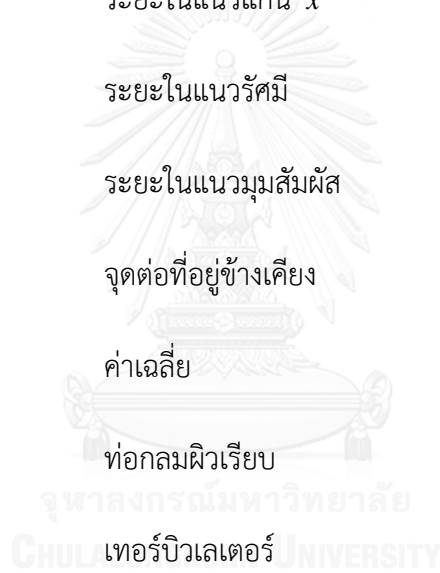
m ค่าเฉลี่ย

p ท่อกลมผิวเรียบ

t เทอร์บิวเลเตอร์

w ผนังของท่อกลม

f ของไหล



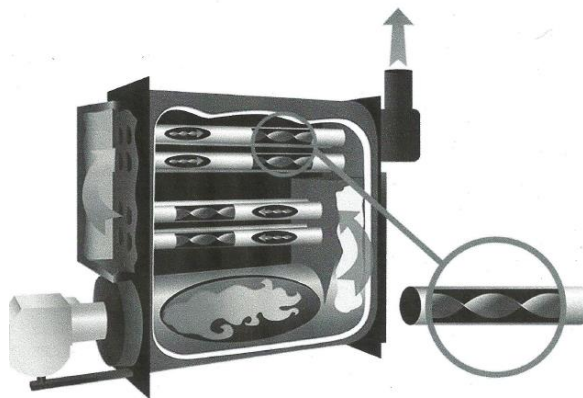
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

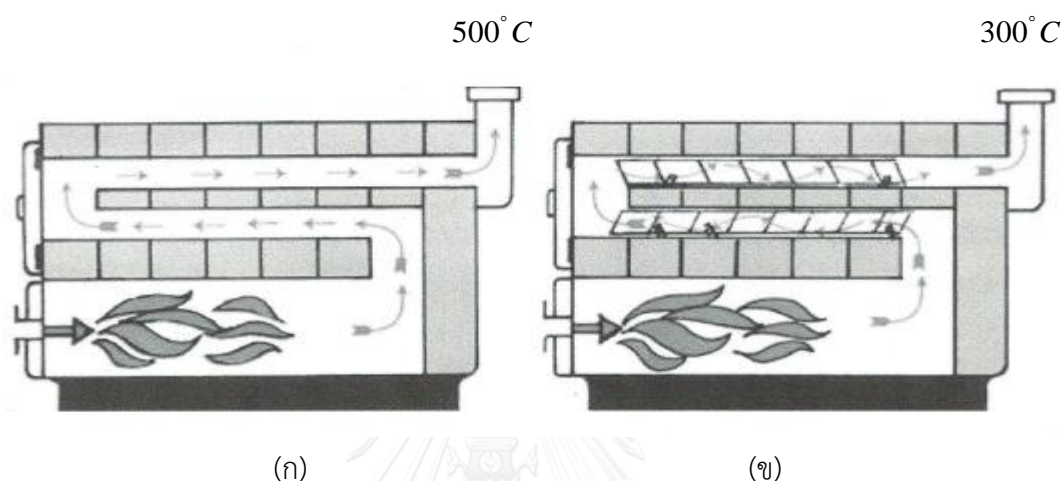
การวิเคราะห์การไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้ในการประยุกต์ใช้สำหรับการจำลองในการวิเคราะห์การไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อน เพื่อประหยัดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายได้ไม่มากนักน้อย โดยวิธีการวิเคราะห์ปัญหาแบบนี้เรียกว่า การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

รูปแบบหนึ่งของลักษณะการไหลทางวิศวกรรมที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากก็คือ การไหลผ่านช่องท่อกลมที่มีการติดตั้งสิ่งกีดขวางไว้ภายใน การติดตั้งสิ่งกีดขวางลักษณะดังกล่าว ก็เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับท่อ เพิ่มการผสมกันของของไหล เร่งการเกิดปฏิกิริยาของของไหลมากขึ้น และเปลี่ยนลักษณะการไหลจากแบบราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วนคือ เพิ่มระดับความปั่นป่วน (Turbulent intensity) พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat transfer area) และระดับพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy, TKE) สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกศึกษาเทอร์บิวเลเตอร์ (Turbulators) ซึ่งทำหน้าที่เหมือนสิ่งกีดขวางรูปแบบหนึ่งเพื่อเพิ่มความสามารถให้แก่การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ เช่น หม้อไอน้ำ (Boilers) เตาเผาไหม้ (Stoves) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and tube heat exchangers) เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (Tubular reactor) และเครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ลง (Falling-film evaporators) เป็นต้น



รูปที่ 1.1 การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ [1]

รูปที่ 1.1 แสดงการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ โดยเทอร์บิวเลเตอร์ที่ใช้คือ เทอร์บิวเลเตอร์แผ่นเกลียวบิด (Twisted tape turbulator) ซึ่งมีหน้าที่ช่วยให้การไหลของของไหลภายในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟเปลี่ยนลักษณะการไหลจากแบบราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วน หรือเพิ่มระดับความปั่นป่วนของของไหล ซึ่งส่งผลให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น และช่วยลดการสิ้นเปลืองของพลังงานลง



รูปที่ 1.2 การเปรียบเทียบการทำงานของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ [2]

(ก) หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

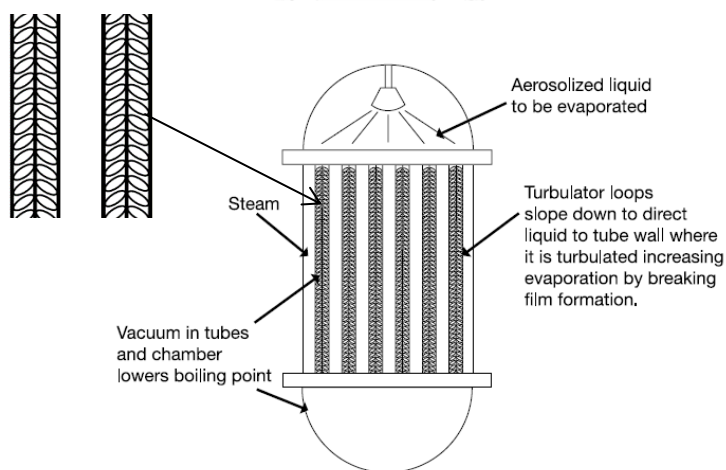
(ข) หม้อไอน้ำแบบท่อไฟที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์

รูปที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างหม้อไอน้ำแบบท่อไฟและหม้อไอน้ำแบบท่อไฟที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ โดยหม้อไอน้ำแบบท่อไฟที่ไม่ได้ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ (ดังรูป 1.2 (ก)) จะสังเกตได้ว่า อากาศร้อนที่เคลื่อนที่ไปตามทิศทางดังกล่าวไม่ได้รับผลกระทบจากการสัมผัสกับผนังช่องอากาศเท่าที่ควร จึงก่อให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงบริเวณปล่องควันขาออก และสำหรับหม้อไอน้ำแบบท่อไฟที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ (ดังรูป 1.2 (ข)) จะสังเกตได้ว่า อากาศร้อนที่เคลื่อนที่ไปตามทิศทางดังกล่าวโดยไหลผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ เป็นผลให้เกิดการเพิ่มระดับความปั่นป่วนบริเวณที่อากาศร้อนสัมผัสกับเทอร์บิวเลเตอร์ เมื่อติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์เข้าไปจะช่วยเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งทำให้อากาศร้อนสามารถได้รับผลกระทบจากการสัมผัสกับผนังช่องอากาศได้มากขึ้น จึงส่งผลให้บริเวณปล่องควันขาออกมีอุณหภูมิลดลง กล่าวคือ การทำงานของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น



รูปที่ 1.3 การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ [2]

รูปที่ 1.3 แสดงการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ โดยเทอร์บิวเลเตอร์ที่ใช้คือ เทอร์บิวเลเตอร์แผ่นเกลียวบิด (Twisted tape turbulator) ซึ่งมีหน้าที่ช่วยให้การไหลเพิ่มระดับความปั่นป่วน และมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น และช่วยลดการสิ้นเปลืองของพลังงานลง



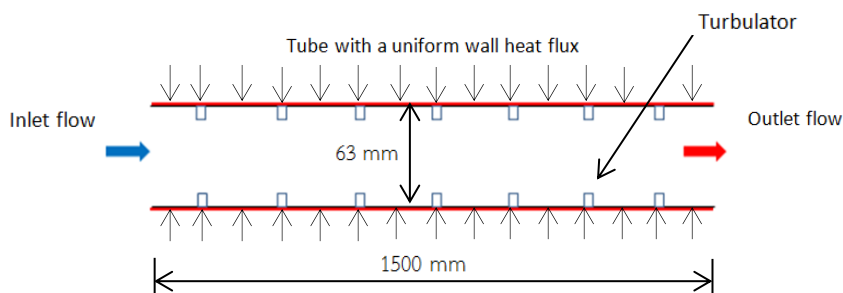
รูปที่ 1.4 การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในเครื่องระเหยแบบฟลัมเคลื่อนที่ลง [3]

รูปที่ 1.4 แสดงการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในเครื่องระเหยแบบฟลัมเคลื่อนที่ลง โดยเทอร์บิวเลเตอร์มีหน้าที่ช่วยเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อกลมขนาดเล็กภายในเครื่องระเหยแบบฟลัม โดยจะการไหลเพิ่มระดับความปั่นป่วน และมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้การระเหยมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมในท่อกลมที่มีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายใน โดยมีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพ หรือสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลม ซึ่งในการศึกษาเกี่ยวกับปัญหานี้เราต้องมีความรู้ความเข้าใจดังต่อไปนี้

1.1.1 เทอร์บิวเลเตอร์ (Turbulators)

เทอร์บิวเลเตอร์ (Turbulators) เป็นอุปกรณ์ที่นำไปใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนให้แก่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้หลักการของ Passive technique โดยเทอร์บิวเลเตอร์จะมีหน้าที่ช่วยเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat transfer area) และเพิ่มระดับความเร็วเมื่อของไหลไหลผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ โดยจะส่งผลให้เพิ่มระดับของความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ของการไหล โดยเทอร์บิวเลเตอร์นั้นมีด้วยกันหลายประเภทซึ่งจำแนกออกตามลักษณะรูปร่างของโมเดล เช่น เทอร์บิวเลเตอร์แผ่นเกลียวบิด (Twisted tape turbulator) เทอร์บิวเลเตอร์สปริง (Spring turbulator) เทอร์บิวเลเตอร์ลูกบอล (Ball turbulator) และเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวน (Ring turbulator) เป็นต้น ซึ่งการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ ส่วนใหญ่จะมีความยาวของเทอร์บิวเลเตอร์เท่ากับความยาวของท่อกลม เช่น การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์แผ่นเกลียวบิดภายในหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (ดังรูปที่ 1.1) และการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์แผ่นเกลียวบิดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (ดังรูปที่ 1.3) เป็นต้น โดยการติดตั้งลักษณะดังกล่าวจะส่งผลให้ความดันตกคร่อมภายในท่อกลมมีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม Circular-ring turbulators (CRT) เพื่อลดระดับความดันตกคร่อมภายในท่อกลม โดยการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมนั้นเป็นการติดตั้งที่แบ่งระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์ออกเป็นช่วงๆ โดยมีอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio, PR) เป็นค่ากำหนดระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์ภายในท่อกลม แสดงดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในท่อกลมโดยกำหนดให้พิลลัคซ์ความร้อนคงที่

1.1.1.1 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม Circular-ring turbulators (CRT)

สำหรับการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมจะใช้หลักการ Passive technique เข้ามาช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของการไหลของภายในท่อกลมเพื่อทำให้การไหลเปลี่ยนสถานะจากแบบราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วน หรือเพิ่มลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนให้มีความปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น เพิ่มค่าระดับความปั่นป่วน (Turbulent intensity) โดยลักษณะรูปร่างของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมนั้นแสดงดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม Circular-ring turbulators (CRT)

กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ [4]

(ก) ด้านหน้าของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม

(ข) ด้านข้างของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม

รูปที่ 1.6 แสดงเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม Circular-ring turbulators (CRT) โดยกำหนดให้ท่อกลมมีพลัสความร้อนคงที่ที่บริเวณผนังภายนอก มีความยาว (L) เท่ากับ 1.5 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D_i) เท่ากับ 63 มิลลิเมตร โดยเทอร์บิวเลเตอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D_o) เท่ากับ 62 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 1.5) ทั้งนี้เทอร์บิวเลเตอร์ในแต่ละตำแหน่งจะสอดคล้องกับ อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์บิวเลเตอร์ (Diameter ratio, $DR = d/D = 0.5D, 0.6D$ และ $0.7D$) และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์ (Pitch ratio, $PR = P/D = 4D$ และ $8D$) โดยอ้างอิงอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์และเส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์บิวเลเตอร์จากการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4] โดยการคำนวณจะกำหนดให้เทอร์บิวเลเตอร์ทุกกรณีมีอัตราส่วนความกว้าง (Width ratio, $WR = W/D$) เท่ากับ $0.081D$

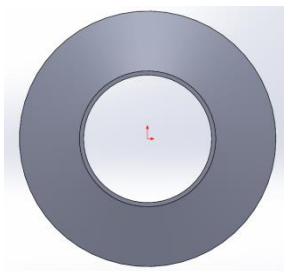
1.1.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเทอร์บิวเลเตอร์

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเทอร์บิวเลเตอร์สามารถทำได้โดยใช้หลักการ Passive technique เข้าช่วยเพื่อทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างของเทอร์บิวเลเตอร์ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

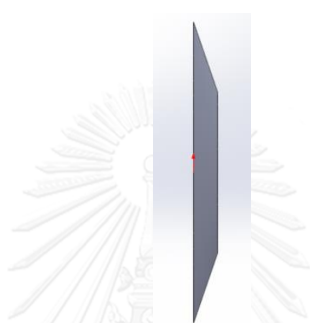
- 1) เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย Conical-ring turbulators (CORT)
- 2) เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง Gear-ring turbulatos (GRT)

1.1.2.1 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย Conical-ring turbulators (CORT)

เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยทำหน้าที่กีดขวางการไหลของของไหล จากความไม่เท่ากันของเส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์บิวเลเตอร์ทั้งสองด้าน กล่าวคือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ทางเข้าและทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์ไม่เท่ากัน ทำให้มีลักษณะรูปร่างคล้ายกับอุปกรณ์ประเภทหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งช่วยให้ความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นเมื่อไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 1.7



(ก) ด้านหน้าของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย



(ข) ด้านข้างของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย

รูปที่ 1.7 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย Conical-ring turbulators (CORT)

กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$

(ก) ด้านหน้าของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย

(ข) ด้านข้างของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย

เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย Conical-ring turbulators (CORT) มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างจากเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม Circular-ring turbulators (CRT) คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทางเข้ากับทางออกไม่เท่ากัน โดยเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทางเข้าเท่ากับ D และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทางออกเท่ากับ $d = 0.5D$ อ้างอิงจากการทดลองของ Kongkaietpaiboon et al. [5] สำหรับค่าพารามิเตอร์และอัตราส่วนต่างๆ ที่ทำการทดสอบจะคล้ายคลึงกับเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม Circular-ring turbulators (CRT)

1.1.2.2 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง Gear-ring turbulators (GRT)

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเทอร์บิวเลเตอร์ประเภทวงแหวนวงกลมและวงแหวนกรวย นับว่าเป็นเทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ อย่างไรก็ตามการใส่เทอร์บิวเลเตอร์เข้าไปในท่อกลมก็ส่งผลให้ความดันตกคร่อมมีค่าสูงขึ้น การลดค่าความดันตกคร่อมดังกล่าวสามารถทำได้โดยการตัดบางส่วนของเทอร์บิวเลเตอร์ออก (Cut-out) ซึ่งอาจเรียกลักษณะรูปร่างแบบนี้ได้ว่า เทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบเฟือง Gear-ring turbulators (GRT) โดยการไหลจะมีความปั่นป่วนมากกว่าเดิมสำหรับบริเวณที่ของไหลสัมผัสกับผนังท่อกลม นั่นคือ ระดับความปั่นป่วน (Turbulent intensity) ถูกเพิ่มมากขึ้นในบริเวณที่ใกล้กับผนังของท่อกลม โดยเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบเฟืองนี้แสดงดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง Gear-ring turbulators (GRT)

กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ และ $N = 10$

(ก) ด้านหน้าของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง

(ข) ด้านข้างของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง

ในที่นี้จะแบ่งช่องการตัดเทอร์บิวเลเตอร์ออกเป็น 3 แบบคือ $N = 6, 8$ และ 10 ตามลำดับ (โดย N แทนจำนวนช่องที่ถูกตัดออก) โดยมีอัตราส่วนความกว้างของช่องที่ถูกตัดออก (WD) เท่ากับ $0.081D$ และกำหนดให้ความลึกของช่องแต่ละช่องที่ถูกตัดออกเท่ากับ 13 มิลลิเมตรในกรณีของ $DR = 0.5D$, 10 มิลลิเมตรในกรณีของ $DR = 0.6D$ และ 7 มิลลิเมตรในกรณีของ $DR = 0.7D$ เนื่องจากต้องการให้มีระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกที่ทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์และบริเวณขอบช่องด้านล่างที่ถูกตัดออกเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การไหลเกิดการเพิ่มระดับความปั่นป่วนมากที่สุดทั้งบริเวณที่ของไหลสัมผัสกับผนังท่อกลม และบริเวณใกล้กับทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์ การเจาะรูหรือการตัดบางส่วนออกบริเวณที่ของไหลไหลผ่านสามารถทำให้ของไหลเพิ่มระดับความปั่นป่วนบริเวณดังกล่าวได้ [5] สำหรับค่าพารามิเตอร์และอัตราส่วนต่างๆ ที่ทำการทดสอบจะคล้ายคลึงกับเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT)

1.2 การศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา

ปัจจุบันได้มีการศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนให้แก่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่นิยมนำมาใช้คือ Passive technique ซึ่งมีข้อดีคือ ไม่ต้องอาศัยแรงจากภายนอก แต่จะอาศัยอุปกรณ์อื่นหรือลักษณะพิเศษของรูปร่างและของผิวเป็นตัวช่วยในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตามการเลือกใช้แต่ละวิธีจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมด้วยทั้งในด้านการออกแบบ ขั้นตอนการผลิต รวมไปถึงการประยุกต์ใช้ด้วย

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้เทอร์บิวเลเตอร์ทำหน้าที่เสมือนสิ่งกีดขวางที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนรูปแบบหนึ่ง โดยทำการศึกษาวิธีเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k-\epsilon$ เพื่อจำลองลักษณะการไหล และการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ โดยเทอร์บิวเลเตอร์ (Turbulators) เป็นอุปกรณ์ที่นำไปใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนให้แก่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้หลักการของ Passive technique โดยทำหน้าที่ช่วยเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat transfer area) เพิ่มระดับของความปั่นป่วน (Turbulence intensity) รวมถึงเพิ่มระดับความเร็วเมื่อของไหลไหลผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยผลงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนผ่านสิ่งกีดขวาง และเทอร์บิวเลเตอร์ อาทิเช่น งานวิจัยของ Kongkaitpaiboon et al. [4] ได้ทำการทดลองศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าความ

ดันตกคร่อมสำหรับของไหลที่มีการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ประเภทวงแหวนวงกลม (Circular-ring turbulator, CRT) โดยมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์บิวเลเตอร์ (Diameter ratio, DR) ต่างกัน 3 ค่า และมีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์ (Pitch ratio, PR) แต่ละตัวต่างกัน 3 ค่า ผลการทดลองพบว่า ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ และยังสรุปได้ว่าที่อัตราส่วนระยะห่างที่สั้นที่สุดและอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุด แต่ค่าความดันตกคร่อมก็สูงตามไปด้วยเช่นกัน และสำหรับผลลัพธ์สำหรับค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดเกิดขึ้นในกรณีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุด (ให้ค่าความดันตกคร่อมน้อยที่สุด) และอัตราส่วนระยะห่างที่สั้นที่สุด (ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด) กล่าวคือ ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าที่ดีที่สุดนั้น จะต้องประกอบไปด้วยค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด และค่าความดันตกคร่อมที่ต่ำที่สุด เนื่องจากค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเป็นอัตราส่วนระหว่างค่านัสเซลสันัมเบอร์กับค่าความดันตกคร่อม จากความสามารถในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาเป็นที่น่าพอใจ แต่ผลการทดลองดังกล่าวเกิดปัญหาในเรื่องของความดันตกคร่อมที่สูงขึ้น Kongkaitpaiboon et al. [5] จึงได้ทำการทดลองต่อเพื่อใช้หลัก Passive technique ในการลดค่าความดันตกคร่อมภายในท่อกลม โดยทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับของไหลที่มีการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ประเภทวงแหวนกรวยและเจาะรูรอบพื้นผิวตามแนวเส้นรอบวง (Perforated conical-ring, PCR) โดยมีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์แต่ละตัวต่างกัน 3 ค่าเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] และมีจำนวนรูที่เจาะต่างกัน 3 ค่า ผลการทดลองพบว่าการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยที่ไม่ถูกเจาะรูมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดเนื่องจากมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อกลมมากกว่าในส่วนที่ถูกเจาะรู แต่เทอร์บิวเลเตอร์ที่ถูกเจาะรูนั้นจะช่วยลดค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลงเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่ไม่ได้เจาะรู เช่น กรณีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ที่มีอัตราส่วนระยะห่างที่ยาวที่สุด (PR = 12) และจำนวนรูที่ถูกเจาะมากที่สุด (N = 8) จะได้ค่าความดันตกคร่อมที่ต่ำที่สุด และยังได้ข้อสรุปอีกอย่างหนึ่งคือ เทคนิคการลดค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยการเจาะรูเพื่อลดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อกลม ซึ่งส่งผลให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดเกิดขึ้นในกรณีของเทอร์บิวเลเตอร์กรวยที่เจาะรู โดยมีอัตราส่วนระยะห่างที่สั้นที่สุด (PR=4) เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์บิวเลเตอร์กรวยที่ไม่ได้เจาะรู

Kumar et al. [6] ทำการเปรียบเทียบค่าของอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (DR) และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์ (PR) เพื่อทำการศึกษาค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน โดยทำการศึกษาลักษณะเดียวกับการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4] แต่เปลี่ยนแปลงค่า DR และ PR ผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเพิ่มค่า DR โดยเพิ่มจาก DR = 0.7 เป็นเท่ากับ 0.8 ผลที่ได้ทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง และเมื่อทำการลดค่า PR โดยลดจาก PR = 4 เป็นเท่ากับ 3, 2 และ 1 ผลที่ได้ทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับการลดของค่า PR

Acir et al. [7] ได้ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [5] สำหรับการทดลองการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) ภายในท่อกลม โดยทำการเจาะรูที่เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม จำนวนรูที่เจาะ (N) ต่างกัน 3 ค่า และมีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์แต่ละตัว (PR) ต่างกัน 3 ค่า ผลการทดลองสรุปว่า การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมที่มีจำนวนรูที่ถูกเจาะน้อยที่สุด และระยะห่างที่สั้นที่สุดให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุด อย่างไรก็ตามค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดถูกพบในกรณีของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมที่มีจำนวนรูที่ถูกเจาะมากที่สุด และระยะห่างที่สั้นที่สุด

Yakut and Sahin [8] ได้ทำการศึกษาดูผลกระทบบของการไหลแบบปั่นป่วน และการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมโดยติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย โดยพิจารณาถึงค่าระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์แต่ละตัว (Pitch) ด้วยกัน 3 ค่า พบว่าค่าระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์ที่สั้นที่สุดสามารถเพิ่มค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุด และพบว่าเมื่อท่อกลมติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์จะทำให้ค่านัสเซลสนัมเบอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat transfer area) ที่เพิ่มขึ้นภายในท่อกลม ต่อมา Yakut et al. [9] ได้ทำการศึกษาลักษณะเดียวกัน แต่ได้ทำการเจาะจงในเรื่องของประสิทธิภาพของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นเดียวกับงานวิจัยเดิม โดยศึกษาปริมาณการลดลงของค่าเฉลี่ยการเกิดของเอนโทรปี (Mean of the entropy-generation) และการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อน จากการทดลองพบว่า ในการทดลองหาค่าเฉลี่ยการเกิดของเอนโทรปี ค่าการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน และค่าการสิ้นสະเทือนของเทอร์บิวเลเตอร์ประเภทวงแหวนกรวย

เหมาะสมที่จะใช้สำหรับการไหลที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ เพราะเนื่องจากค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมภายในท่อกลมมากขึ้น

Eiamsa-ard and Promvong [10] ได้ทำการศึกษาการทดลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อกลม โดยใช้หลัก Passive technique ในการติดตั้งเทอร์มิสเตอร์แบบ V-nozzle โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าของอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเทอร์มิสเตอร์แต่ละตัว (Pitch ratio, PR) 3 ค่า จากการทดลองพบว่า การติดตั้งเทอร์มิสเตอร์ด้วยค่าอัตราส่วนระยะห่างที่สั้นที่สุดทำให้การถ่ายเทความร้อนดีที่สุด แต่จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงที่สุดที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เดียวกัน และในงานวิจัยต่อมา Promvong and Eiamsa-ard [11] ได้ทำการศึกษาการทดลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของของไหลที่ไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิสเตอร์วงแหวนกรวย และเทอร์มิสเตอร์วงแหวนกรวยพร้อมสอดแผ่นเกลียวบิดตลอดความยาวของท่อกลม โดยเทอร์มิสเตอร์วงแหวนกรวยมีหน้าที่ในการเพิ่มความเร็วของของไหล ส่วนแผ่นเกลียวบิดมีหน้าที่ทำให้ของไหลมีลักษณะหมุนวนซึ่งแผ่นเกลียวบิดนี้มีมุมบิด (γ) ต่างกัน 2 ค่า จากผลการทดลองพบว่า ท่อที่ติดตั้งด้วยเทอร์มิสเตอร์วงแหวนกรวยพร้อมสอดแผ่นเกลียวบิดมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบผลของมุมบิดแล้วมุมบิดที่มีขนาดเล็กจะมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนดีกว่ามุมบิดที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุปกรณ์ทั้ง 2 ประเภทนี้จะทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงมากยิ่งขึ้น

Akhavan-Behabadi et al. [12] ได้ทำการศึกษาค่าความดันตกคร่อมของการพาความร้อนแบบบังคับในการกลั่นตัวของสารทำความเย็น R-134a ในท่อกลมโดยใช้หลัก Passive technique ในการติดตั้งขดลวดสปริงภายใน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่ใช้ทำสปริงต่างกัน 3 ค่า และมีระยะห่างระหว่างขดลวดสปริงต่างกัน 3 ค่า โดยผลการทดลองพบว่าความดันตกคร่อมภายในท่อแปรผันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดที่ใช้ทำสปริง โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดที่ใหญ่ที่สุดมีผลทำให้เกิดค่าความดันตกคร่อมสูงที่สุด และระยะห่างระหว่างขดลวดสปริงที่น้อยที่สุดมีผลทำให้ค่าความดันตกคร่อมสูงที่สุด และยังได้ข้อสรุปอีกอย่างหนึ่งว่า อัตราไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นด้วย

Sukchana [13] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่โดยการติดตั้งแปรงลวดภายใน ซึ่งมีลักษณะเป็นแปรงลวดกลมโดยมีความหนาแน่นของเส้นลวดต่างกัน 3 ค่า สำหรับการทดลองกำหนดให้น้ำร้อนไหลในท่อชั้นใน และน้ำเย็นไหลในท่อชั้นนอก การไหลเป็นแบบสวนทางกัน (Counter flow) ผลการทดลองพบว่า ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนแปรผันตามค่าอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อน และความหนาแน่นของเส้นลวดที่ติดตั้งในท่อน้ำร้อน โดยที่ค่านัสเซลสแนมเบอร์เพิ่มขึ้นขึ้นตามความหนาแน่นของแปรงลวด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ในการติดตั้งแปรงลวดภายในท่อกลมนั้นจะทำให้ค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ และค่าความดันตกคร่อมภายในท่อกลมจะแปรผันตามความหนาแน่นของแปรงลวด

Thianpong et al. [14] ทำการศึกษาการทดลองลักษณะการถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของของไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อที่มีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) และเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมที่มีรอยบิด (TRT) โดยมุมในการบิด (y/w) เท่ากับ 3 ในการทดลองมีอัตราส่วนความกว้าง (WD) ต่างกัน 3 ค่า และอัตราส่วนระยะห่าง (PR) ต่างกัน 3 ค่า ผลการทดลองพบว่า ท่อที่มีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมที่มีรอยบิดมีค่านัสเซลสแนมเบอร์ที่สูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับวงแหวนที่มีรอยบิดพบว่า อัตราส่วนความกว้างที่กว้างที่สุด และอัตราส่วนความห่างที่สั้นที่สุด จะมีค่านัสเซลสแนมเบอร์ที่มากที่สุด กล่าวคือ การถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดเกิดขึ้นในกรณี อัตราส่วนความกว้างที่กว้างที่สุดและอัตราส่วนความห่างที่สั้นที่สุด และยังสามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนความกว้างและอัตราส่วนระยะห่างที่เล็กที่สุดของท่อที่มีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนที่มีรอยบิดจะมีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุด

Muthusamy et al. [15] ได้ทำการทดลองหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์บิวเลเตอร์ประเภทวงแหวนกรวยที่ติดตั้งภายในท่อกลม โดยมีเทคนิคในการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนโดยการตีแผ่นครีบเข้าไปภายในเทอร์บิวเลเตอร์ตลอดความยาวของเทอร์บิวเลเตอร์ เพื่อเพิ่มระดับความปั่นป่วนในการไหลของไหล โดยมีอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio, PR) ต่างกัน 3 ค่า ผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะสอดคล้องและมีแนวโน้มไปทางทิศเดียวกันกับงานวิจัยของ Yakut and Sahin [8] โดยค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าที่ดีที่สุดเกิดขึ้นในกรณีของอัตราส่วนระยะห่างที่เล็กที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่า การ

ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ที่มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดควรติดตั้งให้เทอร์บิวเลเตอร์แต่ละตัวให้มีระยะห่างที่ห่างจากกันสั้นที่สุด แต่ในขณะเดียวกันต้องคำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นด้วย เพราะอาจส่งผลให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าที่ไม่ดีนัก

Duangthongsuk and Wongwises [16] ทำการศึกษาการทดลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมภายในท่อกลมที่ติดตั้งอุปกรณ์ใบมีดเทอร์ไบน์ที่สามารถหมุนได้ในท่อกลม (Rotating turbine-type swirl generators, RTSG) ผลที่ได้จากการทดลองสรุปว่า ท่อกลมที่ติดตั้งอุปกรณ์ RTSG มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าท่อกลมผิวเรียบ แต่ส่งผลทำให้มีค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นด้วย จากผลของการทดลองที่ได้นั้นจึงได้มีการคำนึงถึงเรื่องความสามารถในการลดค่าของความดันตกคร่อมภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งต่อมา Duangthongsuk and Wongwises [17] ได้ทำการทดลองการเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งอุปกรณ์ใบมีดเทอร์ไบน์ 2 ประเภทคือ 1) ใบมีดเทอร์ไบน์ที่สามารถหมุนได้ (Rotating turbine-type swirl generators, RTSG) และ 2) ใบมีดเทอร์ไบน์ที่กำหนดให้หยุดนิ่ง (Fitted turbine-type swirl generators, FTSG) โดยทดลองที่ค่าพารามิเตอร์เหมือนกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [16] ผลที่ได้จากการทดลองสรุปว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อของไหลไหลผ่านอุปกรณ์ RTSG และ FTSG และสำหรับการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น เมื่อเทียบกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนผิวเรียบ แต่จะส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นด้วย ผลสรุปที่ได้จากการทดลองการเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสำหรับอุปกรณ์ 2 ประเภทนี้คือ ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งอุปกรณ์ RTSG ที่เกิดการหมุนจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนออกมาดีกว่าการติดตั้งอุปกรณ์ FTSG ที่กำหนดให้หยุดนิ่ง เนื่องจากการไหลมีลักษณะถูกทำให้หมุนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อเปรียบเทียบผลของค่าความดันตกคร่อมภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนการติดตั้งอุปกรณ์ RTSG มีค่าความดันตกคร่อมที่น้อยลงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับติดตั้งอุปกรณ์ FTSG จึงได้ข้อสรุปที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การทำให้สิ่งกีดขวางในการไหลเกิดการเคลื่อนที่ได้นั้นจะทำให้ค่าความดันตกคร่อมลดน้อยลงเมื่อเทียบกับการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่หยุดนิ่ง

Panyarattana and Putivisitak [18] ทำการศึกษาลักษณะการไหลแบบ 2 มิติ ผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงสี่เหลี่ยม 2 แห่งในช่องทางไหลด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ และทำการศึกษาผลกระทบต่อขนาดของบริเวณการหมุนวนข้างหลังสิ่งกีดขวางทั้งที่ Upstream และ Downstream ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรหลัก คือ ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ และค่าอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio) ในการวิเคราะห์นี้สิ่งกีดขวางได้ถูกจัดวางในรูปแบบต่างๆ ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้ พบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรหลักและการจัดวางแบบต่างๆ มีผลต่อรูปร่างความเร็วของการไหลที่เปลี่ยนไป

Kauwaranyu [19] ได้ทำการศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันก๊าซที่มีเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยนำผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองหรือผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ จากนั้นจึงนำโปรแกรมไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ โดยทำการจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์ที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ การจัดวางบนผนังด้านข้างเพียงด้านเดียว การจัดวางบนผนังด้านบนและล่างแบบ In-lined และการจัดวางบนผนังด้านบนและล่างแบบ Staggered ในช่องทางไหล โดยได้ศึกษาถึงผลกระทบต่อที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์หลัก เช่น ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ความสูงของเทอร์บิวเลเตอร์ (h/w) และระยะช่องว่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์ (Pi/h) จากผลการคำนวณพบว่า ช่องทางไหลซึ่งติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าช่องทางไหลผนังเรียบ และจากการเปรียบเทียบรูปแบบการจัดวางทั้ง 3 แบบ การจัดวางเทอร์บิวเลเตอร์แบบ Staggered ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด เนื่องจากการจัดวางแบบนี้จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างสูงและมีความดันตกคร่อมไม่สูงมากนักสำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ทุกๆ ค่า

Akansu [20] ได้ทำการศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อมสำหรับอุปกรณ์เทอร์บิวเลเตอร์ประเภทวงแหวนวงกลมภายในท่อกลม โดยมีค่าพลาซึความร้อนภายนอกของท่อกลมคงที่ โดยใช้โปรแกรม FLUENT VERSION 6.1.22 สำหรับการทดลอง โดยทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนความสูงของเทอร์บิวเลเตอร์ (H/D) และอัตราส่วนระยะห่างของเทอร์บิวเลเตอร์ (L/D) ผลการคำนวณสรุปได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความสูงของเทอร์บิวเลเตอร์

จะส่งผลให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น และในการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระยะห่างของเทอร์บิวเลเตอร์จะส่งผลให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยลง

Pathipakka and Sivashanmugam [21] ได้ศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม FLUENT VERSION 6.3.26 ในการคำนวณลักษณะการถ่ายเทความร้อนสำหรับของไหลนาโนที่ไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลมที่ติดตั้งแผ่นเกลียวบิด โดยมีมุมบิด (Y) เท่ากับ ($y/w = 2.93, 3.91$ และ 4.89) ตามลำดับ โดยศึกษาแผ่นเกลียวบิดที่มีมุมบิดต่างกัน และค่าความเข้มข้นของ Al_2O_3 ที่ผสมกับน้ำต่างกัน ผลลัพธ์ในการคำนวณสรุปว่า การเพิ่มค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สุดเกิดในกรณีค่ามุมบิดของแผ่นเกลียวบิดที่เล็กที่สุด และค่าความเข้มข้นของ Al_2O_3 ที่ผสมกับน้ำที่มากที่สุด

Rao et al. [22] ได้ทำการเปรียบเทียบการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับช่องทางการไหลที่มีลักษณะของแผ่นทดสอบที่ต่างกัน 2 กรณีคือ รอยบวมแบบทรงกลม และรอยบวมแบบหยดน้ำ สำหรับทั้งสองรอยบวมนี้มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่เท่ากัน โดยทำการศึกษาการไหลแบบ 3 มิติ และเมื่อเปรียบเทียบรอยบวมแบบหยดน้ำและรอยบวมแบบทรงกลมพบว่า ช่องทางการไหลสำหรับของไหลที่ผ่านรอยบวมแบบหยดน้ำมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่ารอยบวมแบบทรงกลม ซึ่งรวมไปถึงค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าด้วย

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยหลักการ Passive technique โดยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในท่อกลม โดยเทอร์บิวเลเตอร์จะมีหน้าที่ช่วยเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนและระดับความปั่นป่วนของของไหลภายในท่อกลม โดยจะใช้เทคนิคการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระยะห่างของแต่ละเทอร์บิวเลเตอร์ (Pitch ratio, PR) [8-10] และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์บิวเลเตอร์ (Diameter ratio, DR) [4] ซึ่งนับว่าเป็นเทคนิคที่ดีและให้ผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลม แต่สิ่งหนึ่งที่สำคัญในการใช้อุปกรณ์เพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนนั้นคือ เมื่อเพิ่มอุปกรณ์ใดๆจะส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูงขึ้นด้วย สำหรับการลดค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยการลดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนบางส่วนโดยการตัด หรือการเจาะรูของเทอร์บิวเลเตอร์ [5, 7]

เนื่องจากงานวิจัยที่วิจัยที่กล่าวมาข้างต้นส่วนใหญ่มีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ที่มีลักษณะรูปร่าง และมีพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน เพื่อให้สะดวกต่อการเปรียบเทียบข้อมูลจึงสรุปเป็นตารางสำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาได้ดังนี้

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบข้อมูลต่างๆ ของงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้หลักการ Passive technique ในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายภาพความร้อน

งานวิจัย	ลักษณะของสิ่งที่ศึกษา	พารามิเตอร์ที่ผลต่อการถ่ายภาพความร้อน	สมรรถนะการถ่ายภาพความร้อน
Kongkaitpaiboon et al. [4]	CRT	DR และ PR	✓
Kongkaitpaiboon et al. [5]	PCR	PR และ N	✓
Kumar et al. [6]	CRT	DR และ PR	✓
Acir et al. [7]	CRT	PR และ N	✓
Yakut and Sahin [8]	CORT	ระยะ Pitch	✗
Yakut et al. [9]	CORT	ระยะ Pitch	✗

งานวิจัย	ลักษณะของสิ่งกีดขวาง	พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน	สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน
Promvongse and Eiamsa-ard [11]	CORT และ Twisted tape	มุมบิด (γ)	✓
Akhavan-Behabadi et al. [12]	ขดลวดสปริง	ระยะ Diameter และระยะ Pitch	✗
Sukchana [13]	แปรงขดลวด	ความหนาแน่นของเส้นลวด	✗
Thianpong et al. [14]	CRT และ TRT	WD และ PR	✓
Muthusamy et al. [15]	CORT with fin	PR	✓
Duangthongsuk and Wongwises [16]	RTSG	ระยะ Pitch	✗
Duangthongsuk and Wongwises [17]	RTSG และ FTSG	ระยะ Pitch	✗

งานวิจัย	ลักษณะของสิ่งกีดขวาง	พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการ ถ่ายเทความร้อน	สมรรถนะการถ่ายเท ความร้อน
Panyarattana and Putivutisak [18]	สิ่งกีดขวางรูปสี่เหลี่ยม	PR	✗
Kauwaranyu [19]	เทอร์บิวเลเตอร์	การจัดวางตำแหน่งของ เทอร์บิวเลเตอร์	✗
Akansu [20]	CRT	H/D และ L/D	✗
Pathipakka and Sivashanmugam [21]	Twisted tape	มุมบิด (γ)	✓
Rao et al. [22]	Dimple	ลักษณะรูปร่างของรอยบุ๋ม	✓

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้เทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบวงแหวนวงกลม Circular-ring turbulators (CRT) [4] ในการศึกษาขั้นแรก เนื่องจากเมื่อทำการเปรียบเทียบเทอร์บิวเลเตอร์แต่ละรูปแบบจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบวงแหวน (Ring turbulators (CRT) ให้ค่าความดันตกคร่อมที่ต่ำที่สุด เพราะเป็นการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์แบบเป็นช่วงๆ ตลอดความยาวของท่อกลม โดยมีตัวกำหนดการเว้นระยะห่างโดยใช้ค่า PR

2. การเลือกใช้ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter ratio, DR) พบว่า การเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนควรเลือกใช้ค่า DR อยู่ในช่วง $0.5D - 0.7D$ โดยใช้หลักการวิเคราะห์ดังนี้

- ถ้าค่า DR มีค่าต่ำกว่า $0.5D$ จะทำให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนลดลง อ้างอิงจากการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4]

- ถ้าค่า DR มีค่าสูงกว่า $0.7D$ จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง โดยการไหลจะไม่ได้รับผลกระทบของค่า DR อ้างอิงจากการทดลองของ Kumar et al. [6]

3. การเลือกใช้ค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์ (Pitch ratio, PR) ควรเลือกใช้ค่า PR อยู่ในช่วง $4D - 8D$ โดยใช้หลักการวิเคราะห์ดังนี้

- ถ้าค่า PR มีค่าต่ำกว่า $4D$ จะทำให้ค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นสูงมากเพราะต้องเพิ่มจำนวนของเทอร์บิวเลเตอร์ภายในท่อกลม อ้างอิงจากการทดลองของ Kumar et al. [6]

- ถ้าค่า PR มีค่ามากกว่า $8D$ จะทำให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนลดลง เนื่องจากถ้าเพิ่มระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์ (PR) จะส่งผลให้จำนวนของเทอร์บิวเลเตอร์ลดลง สามารถอ้างอิงจากการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4]

4. การเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k - \epsilon$ สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบดังกล่าวนี้ได้รับความนิยมในการใช้ในการคำนวณกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตตลอดจนถึงปัจจุบัน และยังเป็นแบบจำลองพื้นฐานที่สามารถคำนวณลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนทั่วไปได้

จากการศึกษาการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มในการวิเคราะห์ปัญหาลักษณะการไหล การถ่ายเทความร้อน ความดันตกคร่อม และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ โดยใช้หลัก Passive technique และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คล้ายกันกับกรณีของ Kongkaitpaiboon et al. [4] และใช้เทคนิคในการลดค่าความดันตกคร่อม และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน [5, 7] มาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เทอร์บิวเลเตอร์โดยทำการตัดแปลงจากการเจาะรูให้เป็นการตัดบางส่วนออกโดยมีลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยมที่ถูกต้องออกบริเวณพื้นผิวตามแนวเส้นรอบวงภายนอก สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้คือ แบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ [23] เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายที่สามารถทำนายการไหลแบบปั่นป่วนลักษณะทั่วไปได้ สำหรับการคำนวณการไหลจะเริ่มจากสมการควบคุมพื้นฐานซึ่งประกอบด้วย สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน โดยจะคำนวณไปพร้อมๆ กันโดยพิจารณาลักษณะปัญหาในรูปแบบ 3 มิติ สำหรับการคำนวณผลลัพธ์นั้นจะมีหลักการคือ การแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ จากนั้นทำการกระจายพจน์ของเทอมการพาเป็นสมการพีชคณิตอย่างง่ายรวมกันกับการใช้ Numerical scheme แบบ QUICK ซึ่งเป็น Differencing Scheme ที่มีความถูกต้องในอันดับที่สอง (2^{nd} order scheme) ที่ทำให้เพิ่มความแม่นยำของคำตอบมากขึ้น จากสมการพีชคณิตนั้นจะทำการแก้สมการด้วยวิธี Tri-diagonal matrix algorithm (TDMA) ร่วมกันกับขั้นตอนวิธี SIMPLE [24] เพื่อเข้าสู่กระบวนการหาผลเฉลยและเข้าสู่กระบวนการทำซ้ำจนได้ผลลัพธ์ที่ลู่เข้า

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะพลศาสตร์ของไหล และลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ และเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนระหว่างท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ และท่อแลกเปลี่ยนความร้อนผิวเรียบโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k-\epsilon$

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.4.1 ศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มสำหรับการแก้ปัญหาพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อของวิทยานิพนธ์นี้
- 1.4.2 ศึกษาปรากฏการณ์การไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนด้วยการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence modeling) Standard $k-\epsilon$
- 1.4.3 ทำการศึกษาการไหลของของไหลผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อน โดยภายในที่มีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ประเภทวงแหวนวงกลม วงแหวนกรวย และวงแหวนเฟือง โดยตั้งสมมติฐานดังนี้
 - การไหลเป็นแบบปั่นป่วน
 - คุณสมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่ตลอดทั้งขอบเขตที่พิจารณา
 - การไหลอยู่ในสภาวะคงตัวและเป็นชนิดอัดตัวไม่ได้
 - ของไหลแบบนิวโตเนียน
 - การไหลเกิดใน 3 มิติ
 - ไม่คิดผลกระทบการแรงลอยตัว
- 1.4.4 วิเคราะห์และสรุปผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองหรือผลการคำนวณอื่นที่มีอยู่แล้ว

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มสำหรับการแก้ปัญหากลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อของวิทยานิพนธ์
- 1.5.2 ศึกษาแบบจำลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนแบบ Standard $k-\epsilon$
- 1.5.3 ศึกษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม สำหรับการแก้ปัญหากลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน
- 1.5.4 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับปัญหาอย่างง่ายที่มีผลการทดลองหรือผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ
- 1.5.5 ทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองที่ใช้เงื่อนไขในการทดสอบเดียวกัน และเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากแบบจำลองกับนักศึกษาท่านอื่น
- 1.5.6 วิเคราะห์และสรุปผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม
- 1.5.7 จัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1.6.1 สามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปใช้วิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อน โดยภายในมีการติดตั้งเทอร์มิสเตอร์รูปแบบต่างๆ พร้อมแก้ปัญหากลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนอื่นๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน
- 1.6.2 สามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการระบายความร้อนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- 1.6.3 สามารถออกแบบอุปกรณ์ประเภทเทอร์มิสเตอร์แบบง่าย ที่มีความสอดคล้องกับขนาดการใช้งาน เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและสมการพื้นฐานของการไหล

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการพื้นฐานของการไหลและการถ่ายเทความร้อนของของไหลประกอบไปด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่ประกอบด้วยสมการพื้นฐาน ดังนี้

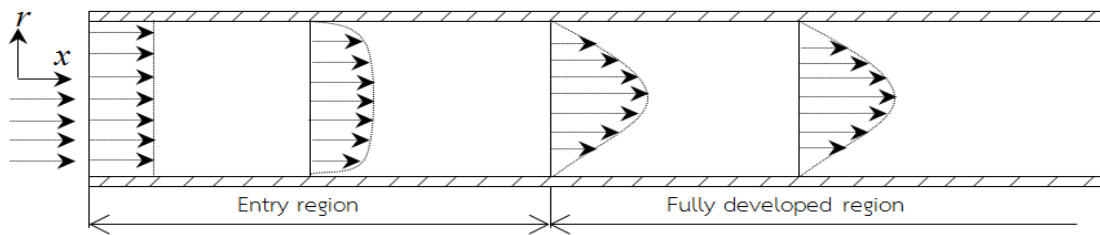
1. สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)
2. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation)
3. สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราจะกล่าวถึงการไหลแบบปั่นป่วน แต่สำหรับการไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลม จะถูกนำมาวิเคราะห์เป็นจุดเริ่มต้นในการแก้สมการการไหลแบบปั่นป่วนต่อไป โดยจะตั้งสมมติฐานว่าของไหลที่นำมาวิเคราะห์มีคุณสมบัติต่อไปนี้

- 1) การไหลเป็นแบบปั่นป่วน
- 2) คุณสมบัติต่างๆของของไหลมีค่าคงที่ตลอดทั้งขอบเขตที่พิจารณา
- 3) การไหลอยู่ในสภาวะคงตัวและเป็นชนิดอัดตัวไม่ได้
- 4) ของไหลแบบนิวโตเนียน
- 5) การไหลเกิดใน 3 มิติ
- 6) ไม่คิดผลกระทบการแรงลอยตัว

2.1 การไหลภายในท่อ

สำหรับการไหลภายในท่อนั้นของไหลที่ไหลเข้าสู่ท่อด้วยความเร็วสม่ำเสมอที่บริเวณทางเข้าของท่อ เมื่อไหลไปตามท่อการแจกแจงความเร็วจะค่อยๆเปลี่ยนไป เนื่องจากได้รับผลกระทบจากความเสียดทานของผิวท่อ จนกระทั่งถึงจุดที่การเปลี่ยนแปลงสมบูรณ์แล้ว การแจกแจงความเร็วจะไม่เปลี่ยนแปลงอีก แสดงดังรูปที่ 2.1 สามารถแบ่งช่วงการไหลภายในท่อออกเป็น 2 ช่วงดังนี้



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงการแจกแจงความเร็วภายในท่อกลม (Velocity profile)

1. ช่วงการไหลแบบกำลังพัฒนา (Entry region) เป็นบริเวณที่การแจกแจงความเร็วกำลังเกิดการเปลี่ยนแปลง ตั้งแต่ช่วงบริเวณทางเข้าจนถึงจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบูรณ์แล้ว

2. ช่วงการไหลแบบเต็มรูป (Fully developed region) เป็นบริเวณที่ต่อจากช่วงการไหลที่กำลังพัฒนา สำหรับช่วงการไหลพัฒนาเต็มที่การแจกแจงความเร็วจะไม่มีเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป

การแจกแจงความเร็วสำหรับการไหลภายในท่อ สามารถหาได้จากสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมในรูปสมการเชิงอนุพันธ์โดยใช้พิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinates) ดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho r u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{u_r}{r} = 0 \quad (2.1)$$

สำหรับการไหลภายในท่อจะพิจารณาเป็นการไหลในสภาวะคงตัว เป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ และไม่มีการเคลื่อนที่ในทิศทางแนวเส้นรอบวง ดังนั้นสมการ (2.1) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

สำหรับการไหลแบบเต็มรูปแล้ว (Fully developed flow) นั่นคือ ความเร็วในแนวรัศมี

$u_r = 0$ เทอมทางซ้ายจึงสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นสามารถลดรูปได้เป็น $\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation)

X - momentum conservation equation :

$$u_r \frac{\partial u_x}{\partial r} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \right] \quad (2.3)$$

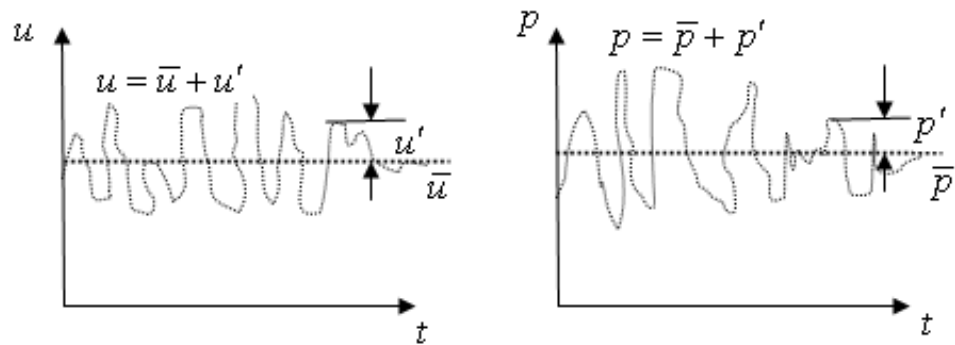
โดยการไหลภายในท่อจะพิจารณาเป็นการไหลในสภาวะคงตัว เป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ ไม่มีการเคลื่อนที่ในทิศทางแนวเส้นรอบวง และไม่คิดแรงต่อน้ำวัตถุ สำหรับสมการ (2.3) สามารถลดรูปได้อีก เนื่องจากสมการความต่อเนื่องนั่นคือ เทอมแรกทางซ้ายมือตัดทิ้งได้เนื่องจาก $u_r = 0$ เทอมที่สองตัดทิ้งได้เนื่องจาก $\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$ และเทอมสุดท้ายตัดทิ้งได้เนื่องจาก $\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = 0$ ดังนั้นจึงลดรูปเหลือ

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{du_x}{dr} \right) = \frac{r}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2.4)$$

2.2 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับการไหลในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลทั่วไปสามารถใช้สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation) ในการหาผลเฉลยของระบบสมการเชิงอนุพันธ์

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนั้นค่าตัวแปรในการไหลจะมีค่าที่ไม่คงที่ และค่าเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น ตัวอย่างของความเร็ว u และความดัน p ที่แสดงดังรูปที่ 2.2 ทำให้การคำนวณค่าตัวแปรเกิดความยุ่งยากในการคำนวณเป็นอย่างมาก จึงมีการสมมติว่าคุณสมบัติต่างๆ ที่พิจารณาในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วนนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน โดยใช้หลัก Reynolds decomposition แบ่งออกเป็นส่วนที่เป็นส่วนที่หนึ่งคือ ค่าเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลาเช่น \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} และ \bar{p} และส่วนที่สองคือ ส่วนที่แทนผลของการสั่น (Fluctuation) ที่ขึ้นกับเวลา เช่น u' , v' , w' และ p'



รูปที่ 2.2 ลักษณะของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการไหลแบบปั่นป่วน

2.2.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

จากกฎการอนุรักษ์มวลกล่าวว่า มวลไม่สามารถสร้างขึ้นเองหรือสูญหายไปจากระบบที่พิจารณาได้ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลทั้งหมดภายในปริมาตรควบคุมใดๆ เท่ากับปริมาณสุทธิที่ไหลออกและเข้าจากผิวของปริมาตรควบคุมนั้นๆ สามารถนำสมการมาเขียนอยู่ในรูปของ Tensor ได้ดังนี้

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.5)$$

เมื่อ $i=1,2$ และ 3 แสดงปริมาณพิกัดในคาร์ทีเซียนเป็นแกน x , y และ z ตามลำดับ

2.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation)

จากสมการอนุรักษ์โมเมนตัมกล่าวว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุมใดๆ มีค่าเท่ากับแรงลัพธ์ที่กระทำกับปริมาตรและผิวของปริมาตรนั้นๆ

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.6)$$

เมื่อ σ_{ij} เป็น Deviatoric part ของ Viscous stress tensor และหาค่าได้จากความสัมพันธ์ของของไหลแบบ Newtonian คือ

$$\sigma_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad (2.7)$$

$$\text{เมื่อ } s_{ij} = \text{คือค่า Mean stain-rate tensor} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.8)$$

จาก Reynolds decomposition ทุกตัวแปรในการไหลสามารถแบ่งออกเป็นส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ย และส่วนที่แทนผลของการสั่น ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชันของ f สามารถเขียนได้เป็น

$$f = \bar{f} + f' \quad (2.9)$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (Time-averaging) ได้ว่า

$$\bar{f}(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(x, t) dt \quad (2.10)$$

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ย จะทำให้ค่าเฉลี่ยของส่วนที่แทนผลของการสั่นนั้นมีค่าเป็นศูนย์ ($\overline{f'} = 0$) และจะได้ค่าเฉลี่ยของผลคูณทั้งสองตัวแปรที่มีค่าเป็น $\overline{fg} = \bar{f}\bar{g} + \overline{f'g'}$

หากทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งกับสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation) จะได้

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.11)$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2.12)$$

สมการ (2.12) นี้มีรูปแบบสมการเหมือนกับสมการ (2.6) ยกเว้นเพียงเทอมของ Kinematic reynolds stress ($R_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$) ที่เพิ่มขึ้นมาและเป็นพจน์ที่ไม่ทราบค่าด้วย แต่สามารถบอกได้ถึงลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนในเทอมของ R_{ij} ทำให้เกิดจำนวนตัวแปรมากกว่าจำนวนสมการ และไม่สามารถแก้สมการเชิงอนุพันธ์ทั้งสองได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยวิธีการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k-\epsilon$ เพราะเนื่องจากเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมและสามารถทำนายคุณลักษณะของการแก้ปัญหาแบบจำลองความปั่นป่วนมากที่สุด

2.2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation)

การศึกษาสมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเราจะเริ่มจากพิจารณาในกรณีการไหลแบบราบเรียบสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบเทนเซอร์ได้ดังนี้

$$\rho \mu_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{\text{Pr}} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (2.13)$$

หลังจากนั้นแทนค่า T ด้วย $T = \bar{T} + T'$ ลงในสมการ (2.13) แล้วทำการเฉลี่ยเช่นเดียวกับสมการความต่อเนื่องและสมการอนุรักษ์โมเมนตัมจะได้ว่า

$$\rho \bar{\mu}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{\text{Pr}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{u'_j T'} \right) \quad (2.14)$$

2.3 แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Modeling)

การศึกษาปรากฏการณ์การไหลแบบปั่นป่วนด้วยวิธีเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหาในการไหลแบบปั่นป่วนมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก จึงได้มีการสร้างแบบจำลองส่วนใหญ่สร้างบนพื้นฐานของ Two-equation Model เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ (Launder and Spalding [23]), Modified $k - \epsilon$ (Sloan et al. [25])

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมใช้ และสามารถคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนในลักษณะทั่วไปได้ คือ Standard $k - \epsilon$ [23] มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$

1) สมการ Turbulent kinetic energy, TKE

สำหรับการไหลซึ่งเป็นแบบการพาและการแพร่กระจายมีผลอย่างมากต่อความแตกต่างในการเกิดและสลายตัวของความปั่นป่วนในการไหล เพื่อให้มีการคำนวณที่แม่นยำขึ้น จึงได้มีการจำลองสมการ Turbulent kinetic energy ถูกเสนอโดย Prandtl ในปี ค.ศ. 1945 (อ้างอิงโดย [26]) ซึ่งได้ประมาณค่า Characteristic velocity scale, v_{mix} สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนโดยให้ v_{mix} มี

ค่าประมาณ $\ell_{mix} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right|$ และได้กำหนดค่า Turbulent kinetic energy ของ turbulent fluctuation ต่อหนึ่งหน่วยมวล (k) มีความสัมพันธ์กับค่า Turbulent velocity fluctuation ดังนี้

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.15)$$

ดังนั้นเราสามารถเขียน Eddy viscosity ในเทอมของความหนาแน่น (ρ), Turbulence length scale (ℓ) และ Turbulent kinetic energy ได้ดังนี้

$$\mu_t = \text{Constant} \bullet \rho k^{\frac{1}{2}} \ell \quad (2.16)$$

ซึ่งการหาค่า k มาแทนลงในสมการ (2.16) ทำได้โดยอาศัยเทอมของ Reynolds stress tensor ซึ่งสามารถจัดอยู่ในรูป

$$R_{ii} = -\rho \overline{u'_i u'_i} = -2\rho k \quad (2.17)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการ (2.17) ค่า k เรียกว่า Turbulent kinetic energy และสามารถหาค่าได้จากสมการเชิงอนุพันธ์ของ Reynolds stress tensor แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\overline{u'_k} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k} = -R_{ik} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k} - R_{jk} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} + \varepsilon_{ij} - \Pi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k} + C_{ijk} \right] \quad (2.18)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \Pi_{ij} = \overline{p' \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)} \quad (2.19a)$$

$$\varepsilon_{ij} = \overline{2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} \quad (2.19b)$$

$$C_{ijk} = \overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{p' u'_j} \delta_{jk} + \overline{p' u'_i} \delta_{ik} \quad (2.19c)$$

และเมื่อแทน R_{ij} จากสมการ (2.17) ลงในสมการ (2.18) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\overline{u'_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = R_{ij} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \overline{\rho u'_i u'_i u'_j} - \overline{p' u'_j} \right] \quad (2.20)$$

เมื่อค่า ε คือค่า Dissipation rate of turbulent kinetic energy ต่อหนึ่งหน่วยมวล ซึ่งสามารถนิยามโดยความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i \partial u'_i}{\partial x_k \partial x_k}} \quad (2.21)$$

สำหรับเทอม Reynolds stress tensor เราจะใช้การประมาณค่าด้วย Boussinesq approximation ซึ่งในการประมาณแบบนี้ จะกำหนดให้ค่า Kinetic reynolds stress มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่า Mean strain rate tensor ($\overline{s_{ij}}$) ดังต่อไปนี้อ้างอิงใน [26]

$$R_{ij} = 2\mu_t \overline{s_{ij}} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.22)$$

เมื่อ $\overline{s_{ij}}$ คือ ค่า Mean strain rate tensor ซึ่งหาค่าได้จาก $\overline{s_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right)$

μ_t คือ Turbulent kinetic viscosity ซึ่งถูกกำหนดค่าโดย $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$ และ $C_\mu = 0.09$

δ_{ij} คือ Kronecker delta function ซึ่งนิยามเป็น

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0; & i \neq j \\ 1; & i = j \end{cases} \quad (2.23)$$

เทอม Turbulent transport และ Pressure diffusion ได้มาจากข้อมูลการทดลองโดยอ้างอิง Mansour et al. [27] ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{2} \overline{\rho u'_i u'_i u'_j} + \overline{p' u'_j} = -\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (2.24)$$

เมื่อค่า σ_k คือค่า Prandtl-schmidt number ซึ่งมีค่าประมาณ 1.0

เทอม Dissipation ถูกจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของค่า Turbulent kinetic energy (k) กับค่า Turbulent length scale (ℓ) ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองขึ้นกับความปั่นป่วนและคุณสมบัติโดยธรรมชาติของการไหล ซึ่งถูกนำเสนอโดย Taylor ในปี ค.ศ. 1935 (อ้างอิงโดย [28]) คือ

$$\varepsilon \approx k^{\frac{3}{2}} / \ell \quad (2.25)$$

เมื่อรวมสมการตั้งแต่ (2.20) - (2.24) เข้าด้วยกัน จะได้สมการ Turbulent kinetic energy, TKE ดังนี้

$$\rho \overline{u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = G - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.26)$$

และเมื่อค่า G คือค่า Rate of turbulent energy production ซึ่งมาสามารถคำนวณได้จาก

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \quad (2.27)$$

2) สมการ Dissipation rate

จากสมการ Transport equation ของ Dissipation rate (ε) สามารถคำนวณโดยใช้หลักความคล้ายคลึงทางมิติที่สอดคล้องกันกับสมการ TKE ดังนั้นจึงกำหนดให้ ε อยู่ในรูปของ Turbulent kinetic energy และ Turbulent length scale ได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L} \quad (2.28)$$

เมื่อ L มีความสัมพันธ์กับค่า ℓ_m ดังนี้ $L = C_\mu^{-0.75} \ell_m$ และ ℓ_m คือ Prandtl mixing length ซึ่งนิยามจาก $\ell_m = \max[\kappa y, \lambda \delta]$ (โดยที่ δ คือ Boundary layer thickness, κ คือ Von Karman constant ($\kappa = 0.41$) และ λ คือค่าคงที่ ($\lambda = 0.09$) ดังนั้นสามารถเขียนสมการ ε ได้เป็น

$$\rho \overline{u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.29)$$

3) ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k-\varepsilon$

ในการพิจารณาการไหลแบบปั่นป่วนที่ง่ายที่สุด ทำได้โดยกำหนดให้การไหลเป็นแบบ Isotropic turbulence ดังนั้นสมการ TKE และสมการ ε จึงลดรูปได้เป็น

$$u \frac{\partial k}{\partial x} = -\varepsilon \quad \text{และ} \quad \bar{u} = -C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.30)$$

โดยค่า k มีความสัมพันธ์แบบ Power-law กับ x ($k \propto x^{-n}$) ซึ่งจะได้ว่า

$$C_{\varepsilon 2} = \frac{n+1}{n} \quad (2.31)$$

จากข้อมูลผลการทดลอง (อ้างอิงโดย Durbin and Reif [29]) ค่า n อยู่ในช่วง 1.3 ± 0.2 ในที่นี้เราจะเลือกใช้ค่า $n = 1.2$ จึงทำให้สมการ (2.31) เปลี่ยนไปเป็น

$$C_{\varepsilon 2} = 1.83$$

เมื่อพิจารณาที่บริเวณใกล้กับผนัง (k จะมีค่าคงที่) จะได้ว่าค่าอนุพันธ์ของทุกเทอมในสมการ TKE มีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด ดังนั้นทำให้สมการ TKE เปลี่ยนไปเป็น

$$P = \varepsilon \quad (2.32)$$

จากสมการ (2.31) สังเกตได้ว่าค่า Production เท่ากับค่า Dissipation ซึ่งอยู่ในสภาพที่เรียกว่า Local equilibrium ดังนั้นเราจะได้

$$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad , \quad \varepsilon = \frac{u_\tau^3}{\kappa y} \quad \text{และ} \quad \mu_t = \rho \kappa u_\tau y$$

เมื่อ u_τ คือค่า Friction velocity จากนั้น แทนค่า ε และ μ_t จากความสัมพันธ์ของสมการข้างต้นลงในสมการ ε จะได้

$$\kappa^2 = (C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}) \sigma_\varepsilon \sqrt{C_\mu} \quad (2.33)$$

ดังนั้นค่าคงที่สำหรับการจำลองแบบปั่นป่วน $k-\varepsilon$ เมื่อ Re มีค่าสูงๆ [23]

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon_1} = 1.44 \text{ และ } C_{\varepsilon_2} = 1.83$$

2.5 สรุปสมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

จากเนื้อหาที่กล่าวไปแล้วในบทนี้ เราสามารถสรุปสมการพื้นฐานที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนดังแสดงในตารางที่ 2.1

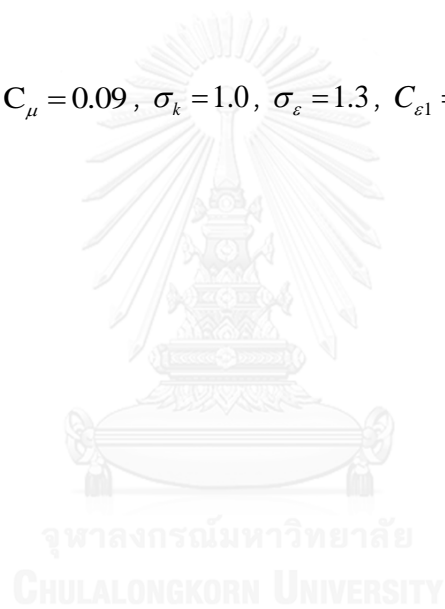
ตารางที่ 2.1 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในรูปแบบของเทนเซอร์สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\varepsilon$

Transport equation	Differential form
Continuity	$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$
Momentum	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \rho \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j}$
Energy	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{u'_j T'} \right)$
Turbulent kinetic energy	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = G - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$
Dissipation rate	$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$
Rate of turbulent energy production	$G = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$
Eddy viscosity	$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$

Reynolds stress	$R_{ij} = 2\mu_t \overline{s_{ij}} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$
Mean strain-rate tensor	$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$
Boussinesq approximation	$R_{ij} = 2\mu_t \overline{s_{ij}} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$

เมื่อ $\sigma_{ij} = 2\mu s_{ij}$

Closure coefficients : $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ และ $C_{\varepsilon 2} = 1.92$



บทที่ 3

ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม

3.1 บทนำ

สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้จะทำการประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มกับวิธีเชิงตัวเลขใช้ร่วมกันแก้ไขปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก คือ

- 1) สมการควบคุมพื้นฐานและการกระจายพจน์
- 2) กระบวนการหาผลเฉลย

3.2 สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equation)

สำหรับการไหลภายในท่อกลมที่รูปแบบทั่วไปของสมการควบคุมพื้นฐานสำหรับปัญหาการไหลในสามมิติ สำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ประกอบไปด้วย สมการอนุรักษ์มวล สมการโมเมนตัม โดยใช้พิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinates) แสดงดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho r u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{u_r}{r} = 0 \quad (3.1)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial (u_x u_x)}{\partial x} + \frac{\partial (u_r u_x)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (u_\theta u_x)}{\partial \theta} + \frac{(u_r u_x)}{r} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{rx}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta x}}{\partial \theta} + \frac{\tau_{rx}}{r} \right) + f_x \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_r}{\partial t} + \frac{\partial (u_x u_r)}{\partial x} + \frac{\partial (u_r u_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (u_\theta u_r)}{\partial \theta} + \frac{(u_r u_r - u_\theta u_\theta)}{r} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \left(\frac{\partial \tau_{xr}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{(\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta})}{r} \right) + f_r \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + \frac{\partial(u_x u_\theta)}{\partial x} + \frac{\partial(u_r u_\theta)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(u_\theta u_\theta)}{\partial \theta} + 2 \frac{(u_r u_\theta)}{r} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{\partial \tau_{x\theta}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} + 2 \frac{\tau_{r\theta}}{r} \right) + f_\theta \end{aligned} \quad (3.4)$$

โดยที่ τ_{ij} คือ the Components of the viscous tensor ($j = x, r, \theta$)

$$\tau_{xx} = 2\nu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right), \quad \tau_{rr} = 2\nu \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right), \quad \tau_{\theta\theta} = 2\nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \right), \quad \tau_{xr} = \tau_{rx} = \nu \left(\frac{\partial u_r}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial r} \right)$$

$$\tau_{x\theta} = \tau_{\theta x} = \nu \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_x}{\partial \theta} \right) \quad \text{และ} \quad \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = \nu \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation)

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(\frac{\partial}{\partial t}(T) + \frac{\partial}{\partial x}(u_x T) + \frac{\partial}{\partial r}(u_r T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(u_\theta T) \right) \\ = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \left(r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) + \dot{q} \end{aligned} \quad (3.5)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการกระจายพจน์สำหรับปัญหาการพาและการแพร่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้รูปแบบทั่วไปของสมการควบคุมพื้นฐานสำหรับปัญหาการไหลสามมิติจะไดดังนี้

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (3.6)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation)

X - momentum conservation equation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (3.7)$$

Y - momentum conservation equation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho vw) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (3.8)$$

Z - momentum conservation equation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (3.9)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u c_p T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v c_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_p T) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q'' \quad (3.10)$$

โดยในบทนี้แสดงการแก้ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม สามารถแสดงให้อยู่รูปทั่วไปของตัวแปร ϕ ได้ และแก้สมการรูปทั่วไปของสมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลในสามมิติได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\phi u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (3.11)$$

3.3 การกระจายพจน์สำหรับปัญหาการพาและการแพร่กระจาย

จากสมการ (3.11) ;

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\phi u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi$$

เป็นสมการเชิงอนุพันธ์พื้นฐานที่นำมาแก้สมการ โดยสามารถใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) มาเปลี่ยนรูปแบบของสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อยให้เป็นสมการพีชคณิต โดยทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุม CV จะได้เป็นดังนี้

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dv + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\phi u_i) dv = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right) dv + \int_{CV} S_\phi dv \quad (3.12)$$

ในกรณีของไหลมีสถานะที่คงตัว (Steady state) จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ ϕ เทียบกับเวลา สามารถตัดเทอมที่ 1 ทางด้านซ้ายของสมการ (3.12) ทิ้งได้ โดยสมการ (3.12) จะลดรูปเป็น

$$\int_{cv} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \phi u_i) dv = \int_{cv} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) dv + \int_{cv} S_\phi dV \quad (3.13)$$

จากสมการ (3.13) เป็นสมการพื้นฐานในรูปทั่วไปที่เขียนในรูปอินทิเกรต เมื่อพิจารณาเป็นปัญหาการแพร่กระจายและการพาในสามมิติจะได้

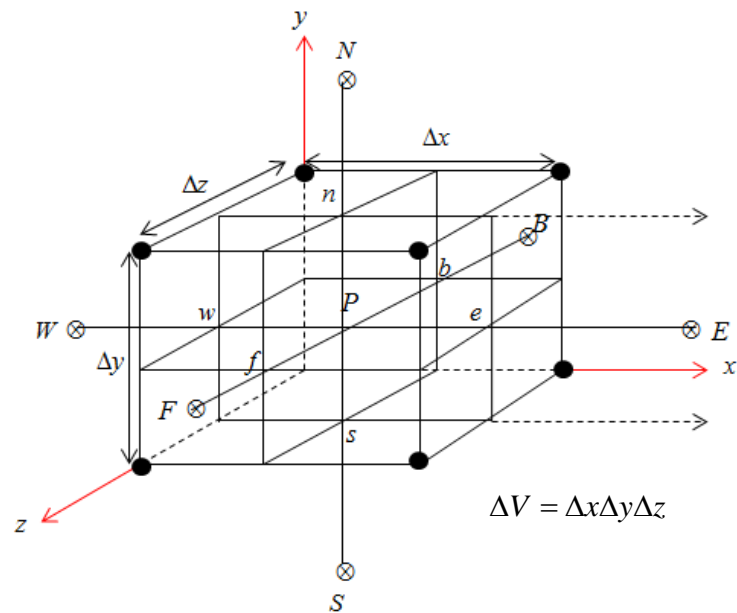
$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_\phi \quad (3.14)$$

เปลี่ยนรูปสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม โดยทำการอินทิเกรตสมการเริ่มต้นตลอดปริมาตรควบคุม

$$\int_{\Delta V} \left[\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} \right] dV = \int_{\Delta V} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_\phi \right] dV \quad (3.15)$$

พิจารณาในปริมาตรควบคุมในสามมิติ (รูปที่ 3.1)

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} dx dy dz = \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) dx dy dz + \int_{\Delta V} S_\phi dV \quad (3.16)$$



รูปที่ 3.1 การวางตัวของปริมาตรควบคุมในสามมิติ

โดยกำหนดให้ $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$, $A_n = A_s = 1 \times \Delta x$ และ $A_b = A_f = 1 \times \Delta z$

3.3.1 เทอมการพา (Convection term)

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} dx dy dz =$$

$$\left[(\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w \right] + \left[(\rho v A)_n \phi_n - (\rho v A)_s \phi_s \right] + \left[(\rho w A)_b \phi_b - (\rho w A)_f \phi_f \right] \quad (3.17)$$

สามารถเขียนแสดงฟลักซ์ที่ไหลผ่านปริมาตรควบคุมได้ดังนี้

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันออก (E)

$$(\rho u A)_e \phi_e = F_e \phi_e \quad (3.18a)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันตก (W)

$$(\rho u A)_w \phi_w = F_w \phi_w \quad (3.18b)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศเหนือ (N)

$$(\rho v A)_n \phi_n = F_n \phi_n \quad (3.18c)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศใต้ (S)

$$(\rho v A)_s \phi_s = F_s \phi_s \quad (3.18d)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (B)

$$(\rho w A)_f \phi_f = F_f \phi_f \quad (3.18e)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันตกเฉียงใต้ (F)

$$(\rho w A)_b \phi_b = F_b \phi_b \quad (3.18f)$$

เมื่อ F คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\rho u A$

3.3.2 เทอมการแพร่กระจาย (Diffusion term)

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) dx dy dz = \left[\Gamma_e A_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \Gamma_w A_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[\Gamma_n A_n \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_n - \Gamma_s A_s \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_s \right] + \left[\Gamma_b A_b \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_b - \Gamma_f A_f \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_f \right] \quad (3.19)$$

การแพร่กระจายที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันออก (E)

$$\Gamma_e A_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e = \Gamma_e A_e \frac{(\phi_E - \phi_P)}{\delta x_{PE}} = D_e (\phi_E - \phi_P) \quad (3.20a)$$

การแพร่กระจายที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันตก (W)

$$\Gamma_w A_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w = \Gamma_w A_w \frac{(\phi_P - \phi_W)}{\delta x_{WP}} = D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (3.20b)$$

การแพร่กระจายที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศเหนือ (N)

$$\Gamma_n A_n \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_n = \Gamma_n A_n \frac{(\phi_N - \phi_P)}{\delta x_{PN}} = D_n (\phi_N - \phi_P) \quad (3.20c)$$

การแพร่กระจายที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศใต้ (S)

$$\Gamma_s A_s \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_s = \Gamma_s A_s \frac{(\phi_P - \phi_S)}{\delta x_{SP}} = D_s (\phi_P - \phi_S) \quad (3.20d)$$

การแพร่กระจายที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (E)

$$\Gamma_f A_f \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_f = \Gamma_f A_f \frac{(\phi_F - \phi_P)}{\delta x_{PF}} = D_f (\phi_F - \phi_P) \quad (3.20e)$$

การแพร่กระจายที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันตกเฉียงใต้ (W)

$$\Gamma_b A_b \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_b = \Gamma_b A_b \frac{(\phi_P - \phi_B)}{\delta x_{BP}} = D_b (\phi_P - \phi_B) \quad (3.20f)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{\Gamma A}{\delta x}$

3.3.3 Source term

เราสามารถประมาณค่า Source term ในรูปของความสัมพันธ์เชิงเส้น

$$S_\phi = S_u + S_p \phi_p \quad (3.21)$$

เมื่อ S_u คือ เทอมค่าคงที่

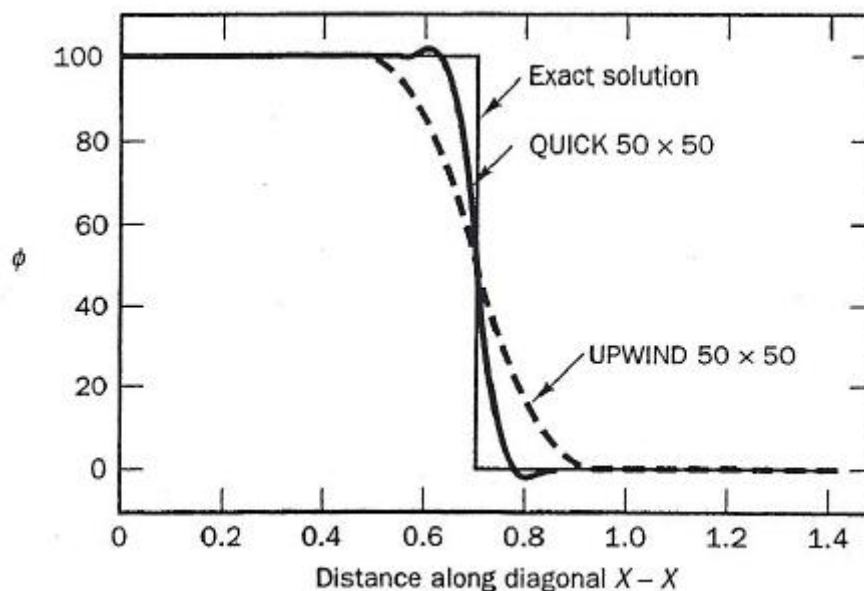
S_p คือ เทอมสัมประสิทธิ์ของ ϕ_p

หลังจากนั้นทำการอินทิเกรตสมการ (3.21) จะได้

$$\int_{\Delta V} S_\phi dV = S_u \Delta V + S_p \phi_p \Delta V \quad (3.22)$$

3.4 การประมาณค่าโดยใช้แบบแผนเชิงตัวเลข

เมื่อทำการประมาณค่าของ ϕ บนปริมาตรควบคุม สามารถทำได้จากการประมาณค่าด้วย Scheme ต่างๆ เช่น Central differencing scheme, Upwind differencing scheme, Second order Upwind differencing scheme, Hybrid differencing scheme, Power-law scheme หรือ Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics (QUICK) เป็นต้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ QUICK scheme เนื่องจาก QUICK scheme ถูกเสนอโดย Leonard (1979) เป็น Scheme ที่ใช้ในการประมาณค่ารูปแบบสมการกำลังสอง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ Upstream 2 จุด และ Downstream 1 จุด ในการประมาณค่าเพื่อความแม่นยำมากขึ้นในการประมาณค่า Convection term กล่าวคือ QUICK scheme เป็น Differencing Scheme ที่มีความถูกต้องในอันดับที่สอง (2^{nd} order scheme) จึงทำให้เพิ่มความแม่นยำของคำตอบมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่าง QUICK scheme และ Upwind scheme จะพบว่า QUICK scheme มีความแม่นยำที่มากกว่า คือ เข้าใกล้ค่า Exact solution มากกว่า Upwind scheme ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเปรียบเทียบผลเฉลย ระหว่าง QUICK scheme และ Upwind scheme [30]

จากสมการ (3.11) จะทำการใช้แบบแผนเชิงตัวเลขอย่างง่ายแสดงให้เห็นถึงสมการพีชคณิตที่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ โดยใช้ Central differencing scheme เป็นการประมาณค่าเชิงเส้นของค่า ϕ โดยทำการหาค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่ Interface ของปริมาตรควบคุมโดยอาศัยค่าจากจุดใกล้เคียงซึ่งมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นโดยพิจารณาจากการวางตัวของปริมาตรควบคุมในสามมิติดังรูปที่ 3.1 ดังนี้

$$\phi_e = \frac{1}{2}(\phi_E + \phi_P) \quad (3.23a)$$

$$\phi_w = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_W) \quad (3.23b)$$

$$\phi_n = \frac{1}{2}(\phi_N + \phi_P) \quad (3.23c)$$

$$\phi_s = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_S) \quad (3.23d)$$

$$\phi_f = \frac{1}{2}(\phi_F + \phi_P) \quad (3.23e)$$

$$\phi_b = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_B) \quad (3.23f)$$

นำสมการ (3.23) แทนค่าลงในสมการ (3.15) และนำค่าเฉลี่ยของค่า ϕ ที่ Interface ต่างๆ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}(\rho u)_e (\phi_E - \phi_P) - \frac{1}{2}(\rho u)_w (\phi_P - \phi_W) + \frac{1}{2}(\rho u)_n (\phi_N - \phi_P) - \frac{1}{2}(\rho u)_s (\phi_P - \phi_S) \\ & + \frac{1}{2}(\rho u)_f (\phi_F - \phi_P) - \frac{1}{2}(\rho u)_b (\phi_P - \phi_B) = \frac{\Gamma_e (\phi_E - \phi_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\Gamma_w (\phi_P - \phi_W)}{(\delta x)_w} + \frac{\Gamma_n (\phi_N - \phi_P)}{(\delta x)_n} \\ & \quad - \frac{\Gamma_s (\phi_P - \phi_S)}{(\delta x)_s} - \frac{\Gamma_f (\phi_F - \phi_P)}{(\delta x)_f} + \frac{\Gamma_b (\phi_P - \phi_B)}{(\delta x)_b} + S_\phi V \end{aligned} \quad (3.24)$$

โดย $F = \rho u A$ และ $D = \frac{\Gamma A}{\delta}$ จะสามารถเขียนสมการพีชคณิตของสมการทั่วไปจาก (3.24) ได้ดังนี้

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_F \phi_F + a_B \phi_B + S_\phi \Delta V \quad (3.25)$$

$$\text{โดยที่ } a_E = D_e - \frac{F_e}{2}$$

$$a_W = D_w - \frac{F_w}{2}$$

$$a_N = D_n - \frac{F_n}{2}$$

$$a_S = D_s - \frac{F_s}{2}$$

$$a_F = D_f - \frac{F_f}{2}$$

$$a_B = D_b - \frac{F_b}{2}$$

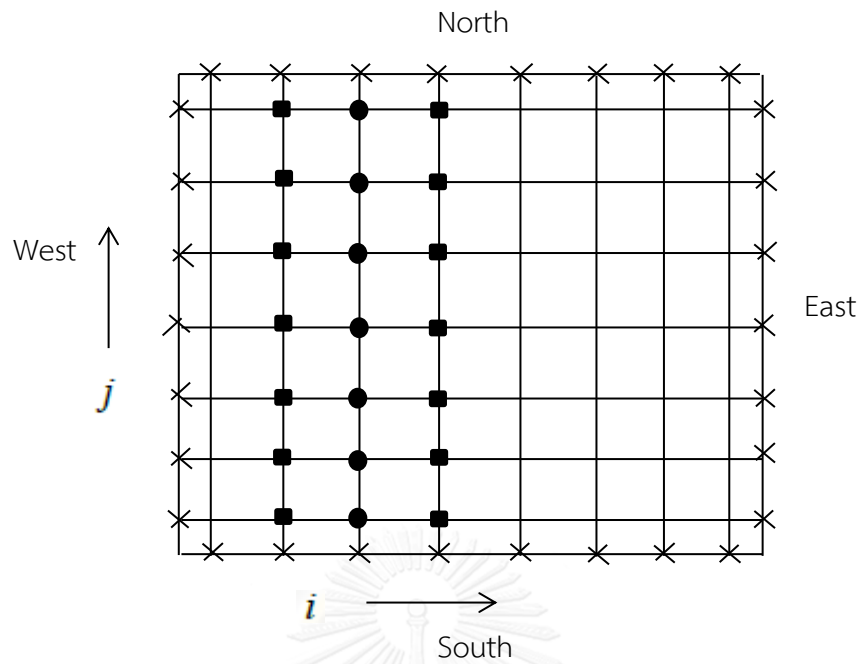
$$\text{และ } a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_F + a_B + (F_e - F_w + F_n - F_s + F_f - F_b) - S_p \Delta V$$

3.5 กระบวนการหาผลเฉลย

กระบวนการหาผลเฉลยนั้นจะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มในการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตที่แต่ละจุดต่อ ซึ่งการหาผลเฉลยจะใช้เทคนิควิธี Tri-diagonal matrix algorithm (TDMA) แบบ Line-by-line ในการแก้ระบบสมการ และเพื่อให้สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการความต่อเนื่องมีความสอดคล้องกัน และใช้กระบวนการหาคำตอบที่เรียกว่าระเบียบวิธี SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations)

3.5.1 ระเบียบวิธี TDMA

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.3 จะพบว่ามีลักษณะเป็นเส้นๆ ประกอบกัน สามารถคำนวณค่าตัวแปรที่จุดต่างๆ บนเส้นแต่ละเส้นโดยวิธี TDMA โดยสมมติว่าทราบค่าบริเวณจุดต่อข้างเคียงและใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (Iterative method) จนได้ผลลัพธ์ที่ลู่เข้า



รูปที่ 3.3 โดเมนการคำนวณ (Computational domain) ที่ใช้ระเบียบวิธี TDMA แบบ line-by-line ในการคำนวณ

สำหรับจุดหนึ่งบนเส้นตัวอย่างในรูปที่ 3.1 และสมการการกระจายพจน์ที่อยู่ในรูปทั่วไปคือ

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + S_c \quad (3.26)$$

โดยที่กำหนดให้ $a_N \phi_N + a_S \phi_S + S_c = C$ ดังนั้นจึงสามารถจัดรูปสมการ (3.26) ใหม่ได้เป็น

$$D_i \phi_i = A_i \phi_{i+1} + B_i \phi_{i-1} + C_i \quad (3.27)$$

เมื่อ i คือ ตำแหน่งของจุดต่อบน Grid ในแนวแกน x หรือแกน y และจากกระบวนการทำซ้ำโดยการแทนไปข้างหน้าสามารถจัดรูปได้เป็น

$$\phi_i = A'_i \phi_{i+1} + C'_i \quad (3.28)$$

ซึ่งค่า A'_i และ C'_i สามารถค่าได้จากกระบวนการทำซ้ำโดยแทนค่าไปข้างหน้า

$$A'_i = \frac{A_i}{D_i - B_i A'_{i-1}} \quad (3.29)$$

$$C'_i = \frac{C_i + C'_{i-1}B_i}{D_i - B_iA'_{i-1}} \quad (3.30)$$

เนื่องจากเราทราบเงื่อนไขขอบของโดเมนการคำนวณ คือ ที่จุด $i=1$ และ $i=n+1$ ดังนั้นจะได้ว่าค่าของ A'_i และ C'_i ที่จุดเหล่านี้ คือ

$$A'_{i=1} = 0 \quad \text{เมื่อ} \quad C'_{i=1} = \phi_1$$

$$A'_{i=n} = 0 \quad \text{เมื่อ} \quad C'_{i=n} = \phi_{n+1}$$

สามารถหาค่าของ A'_i และ C'_i สำหรับทุกๆตำแหน่ง i ได้ และหลังจากนั้นสามารถหาค่าของ ϕ_i ได้ โดยใช้วิธีแทนย้อนกลับ (Backward substitution)

3.5.2 ค่าผ่อนปรน

กระบวนการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์อาจมีการใช้ค่าผ่อนปรนเพื่อควบคุมการลู่เข้าของกระบวนการหาผลเฉลย อีกทั้งยังช่วยลดระดับการเปลี่ยนแปลงค่าการคำนวณได้หลายระดับ ทำให้เกิดเสถียรภาพ (Stability) และความแม่นยำในการคำนวณ โดยเมื่อประยุกต์ใช้ค่าผ่อนปรนกับตัวแปรทั่วไป และ ϕ ที่จุดต่อ P ใดๆ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\phi_p = \alpha\phi_p^{new} + (1-\alpha)\phi_p^{old} \quad (3.31)$$

เมื่อ ϕ^{old} คือ ค่าของ ϕ ที่ได้จากการคำนวณซ้ำรอบที่แล้ว

ϕ^{new} คือ ค่าของ ϕ ที่คำนวณได้โดยตรงจากสมการการกระจายพจน์

α คือ ค่า Under-relaxation factor โดย α มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 และเมื่อประยุกต์ใช้ค่าผ่อนปรนกับสมการการกระจายพจน์สำหรับ ϕ_p จะได้

$$\frac{a_p}{\alpha} = \sum a_{NB}\phi_{NB} + S_u + \frac{(1-\alpha)}{\alpha}a_p\phi_p^{old} \quad (3.32)$$

สำหรับการเลือกใช้ค่าผ่อนปรนที่เหมาะสมนั้น จะขึ้นอยู่กับปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ข้อแนะนำทั่วไปในการใช้ค่าผ่อนปรนกับปัญหาใดๆ คือ ควรใช้ค่าผ่อนปรนที่มีค่าน้อย (มีค่าใกล้ 0)

3.5.3 ระเบียบวิธี SIMPLE

ระเบียบวิธี SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations) ถูกพัฒนาโดย Patankar and Spalding [24], และรายละเอียดเกี่ยวกับระเบียบวิธี SIMPLE อ้างอิงโดย Versteeg and Malalasekera [30] และ Patankar [31] ในการแก้สมการโมเมนตัมผลเฉลยของค่าความเร็ว u , v และ w ที่ได้ ต้องมีความสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง เพื่อให้ผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มนั้นมีความถูกต้อง จึงต้องมีการใช้ระเบียบวิธี SIMPLE ร่วมเข้ามาซึ่งเริ่มต้นด้วยการสมมติค่าความดันและความเร็วของปัญหาการไหล แล้วทำการคำนวณหาค่าความเร็วเพื่อที่จะนำค่าความเร็วนี้ไปคำนวณเพื่อหาความดันอีกครั้งหนึ่ง โดยใช้วิธี Pressure-correction method ช่วยในการคำนวณหาความดันที่ถูกต้อง ซึ่งค่า Pressure-correction ที่ได้ ออกมาจะเอากลับมาใช้เพื่อคำนวณหาความเร็วที่ถูกต้อง และทำซ้ำตามระเบียบวิธีที่ว่ามานี้จนกระทั่งได้ค่าผลเฉลยลู่เข้า สมการการกระจายพจน์ของสมการอนุรักษ์โมเมนตัมในปริมาตรควบคุมที่ผิวหน้า w, s และ b (รูปที่ 3.1) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{แกน } x \quad a_w u_w = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + (p_w - p_p) A + S_u \Delta V \quad (3.33)$$

$$\text{แกน } y \quad a_s v_s = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb} + (p_s - p_p) A + S_v \Delta V \quad (3.34)$$

$$\text{แกน } z \quad a_b w_b = \sum_{nb} a_{nb} w_{nb} + (p_b - p_p) A + S_w \Delta V \quad (3.35)$$

$$\text{โดยที่} \quad \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} = a_E u_E + a_W u_W + a_N u_N + a_S u_S + a_F u_F + a_B u_B - S_P$$

$$\sum_{nb} a_{nb} v_{nb} = a_E v_E + a_W v_W + a_N v_N + a_S v_S + a_F v_F + a_B v_B - S_P$$

$$\sum_{nb} a_{nb} w_{nb} = a_E w_E + a_W w_W + a_N w_N + a_S w_S + a_F w_F + a_B w_B - S_P$$

เราจำทำสมการอนุรักษ์มวลให้อยู่ในรูปของสมการของผลต่างความดัน เพื่อใช้แก้ไขค่าความดันกับความเร็วในสนามการไหลโดยเริ่มจากการสมมติค่าดังนี้

$$p = p^* + p' \quad (3.36a)$$

$$u = u^* + u' \quad (3.36b)$$

$$v = v^* + v' \quad (3.36c)$$

$$w = w^* + w' \quad (3.36d)$$

โดย p, u, v และ w คือ ค่าของความดันและความเร็วที่ถูกต้อง

p^*, u^*, v^* และ w^* คือ ค่าความดันและความเร็วที่คำนวณได้ในแต่ละขั้นตอนได้จาก p^*

p', u', v' และ w' คือ ค่าที่ปรับแก้ไขของความดัน (Pressure correction) และ
ความเร็ว (Velocity correction)

และความเร็ว u^*, v^* และ w^* สามารถคำนวณได้จากสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (3.33 - 3.35) ซึ่ง
สามารถกระจายพจน์ของความเร็วได้เป็น

$$a_w u_w^* = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}^* + (p_w^* - p_p^*) A_w + S_u \Delta V \quad (3.37)$$

$$a_s v_s^* = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb}^* + (p_s^* - p_p^*) A_s + S_v \Delta V \quad (3.38)$$

$$a_b w_b^* = \sum_{nb} a_{nb} w_{nb}^* + (p_b^* - p_p^*) A_b + S_w \Delta V \quad (3.39)$$

และนำสมการ (3.36) แทนในสมการ (3.33 - 3.34) แล้วลบด้วยสมการ (3.37 - 3.39) ตามลำดับ
จะได้เป็น

$$a_w u_w' = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}' + (p_w' - p_p') A_w \quad (3.40)$$

$$a_s v_s' = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb}' + (p_s' - p_p') A_s \quad (3.41)$$

$$a_b w_b' = \sum_{nb} a_{nb} w_{nb}' + (p_b' - p_p') A_b \quad (3.42)$$

โดยกำหนดให้ $\sum_{nb} a_{nb} u'_{nb}$, $\sum_{nb} a_{nb} v'_{nb}$ และ $\sum_{nb} a_{nb} w'_{nb}$ มีค่าเป็นศูนย์ เพื่อง่ายต่อการหาคำตอบ

[31] เมื่อการไหลสอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวล จะได้สมการของค่าแก้ไขความเร็ว (Velocity-correction), u_w เป็น

$$a_w u'_w = (p'_w - p'_p) A_w$$

$$\text{หรือ} \quad u'_w = d_w (p'_w - p'_p) \quad (3.43)$$

$$\text{เมื่อ} \quad d_w = \frac{A_w}{a_w}$$

จากนั้นแทนสมการ (3.43) ลงใน สมการ (3.36b) จะได้

$$u_w = u_w^* + d_w (p'_w - p'_p) \quad (3.44a)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับ u_e, v_n, v_s, w_f และ w_b จะได้

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_E - p'_P) \quad \text{เมื่อ} \quad d_e = \frac{A_e}{a_e} \quad (3.44b)$$

$$v_n = v_n^* + d_n (p'_N - p'_P) \quad \text{เมื่อ} \quad d_n = \frac{A_n}{a_n} \quad (3.44c)$$

$$v_s = v_s^* + d_s (p'_S - p'_P) \quad \text{เมื่อ} \quad d_s = \frac{A_s}{a_s} \quad (3.44d)$$

$$w_f = w_f^* + d_f (p'_B - p'_P) \quad \text{เมื่อ} \quad d_f = \frac{A_f}{a_f} \quad (3.44e)$$

$$w_b = w_b^* + d_b (p'_B - p'_P) \quad \text{เมื่อ} \quad d_b = \frac{A_b}{a_b} \quad (3.44f)$$

จากสมการสมการความต่อเนื่อง สมการ (3.6)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0$$

ทำการอินทิเกรตตลอดทั้งปริมาตรควบคุมได้เป็น

$$\left[(\rho u A)_e - (\rho u A)_w \right] + \left[(\rho u A)_n - (\rho u A)_s \right] + \left[(\rho u A)_f - (\rho u A)_b \right] = 0 \quad (3.45)$$

เมื่อแทนค่าความเร็วจากสมการ (3.44) ลงในสมการ (3.45) จะได้สมการของความดันแก้ไข
(Pressure-correction equation)

$$a_P P'_P = a_E P'_E + a_W P'_W + a_N P'_N + a_S P'_S + a_F P'_F + a_B P'_B + b \quad (3.46)$$

เมื่อ $a_E = \rho_e d_e A_e$

$$a_W = \rho_w d_w A_w$$

$$a_N = \rho_n d_n A_n$$

$$a_S = \rho_s d_s A_s$$

$$a_F = \rho_f d_f A_f$$

$$a_B = \rho_b d_b A_b$$

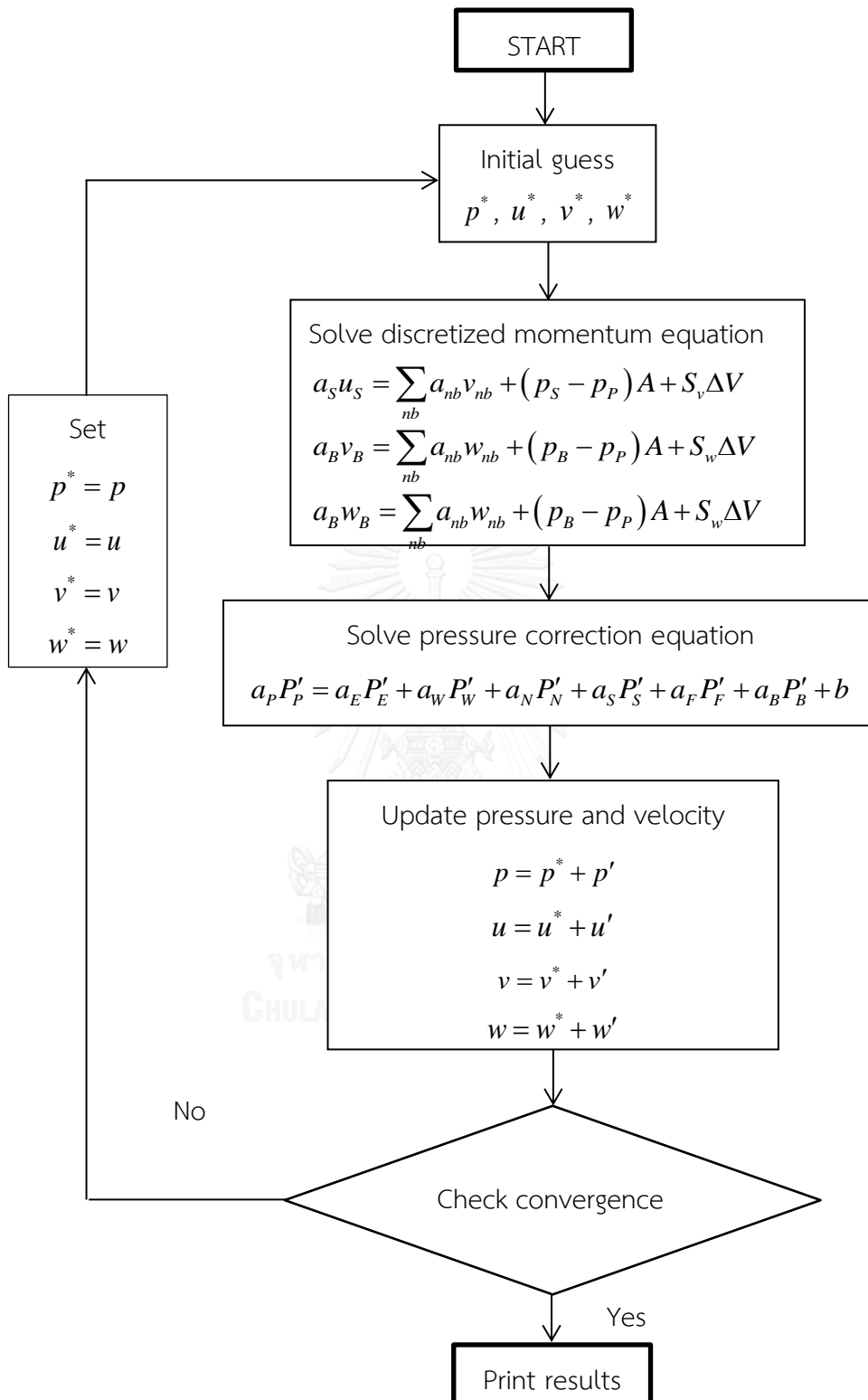
$$b = (\rho u^* A)_e - (\rho u^* A)_w + (\rho v^* A)_n - (\rho v^* A)_s + (\rho w^* A)_f - (\rho w^* A)_b$$



จากวิธีทั้งหมดนี้สามารถสรุประเบียบวิธี SIMPLE ได้ดังนี้

- 1) สมมติค่าของ p^* , u^* , v^* และ w^*
- 2) คำนวณค่า u^* , v^* และ w^* จากสมการ (3.37) - (3.39)
- 3) นำค่า u^* , v^* และ w^* ที่ได้จากการคำนวณมาแทนในสมการ (3.45)
- 4) คำนวณค่า p' จากสมการ (3.46) แล้วนำมาแทนค่าลงในสมการ (3.36a) จากนั้นจึงนำค่า p ที่คำนวณได้มากำหนดให้เป็น p^* ค่าใหม่
- 5) คำนวณค่า u, v และ w จากสมการ (3.43) และ (3.44) โดยใช้ค่า p' จากขั้นตอนที่ 4) จากนั้นจึงกำหนดค่า u, v และ w ที่ได้เป็น u^* , v^* และ w^* ค่าใหม่
- 6) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2) – 5) จนกระทั่ง p^* , u^* , v^* และ w^* มีผลเฉลยลู่เข้าเป็นค่าที่ถูกต้อง โดยตรวจสอบจากการเข้าใกล้ศูนย์ของเทอม b (Mass source term) ในสมการ (3.46) ซึ่งแสดงว่าค่า p^* , u^* , v^* และ w^* ที่คำนวณได้มีความสอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวล

โดยขั้นตอนระเบียบวิธี SIMPLE สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ระเบียบวิธี SIMPLE

บทที่ 4

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

ในบทนี้จะนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มร่วมกับการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ (รายละเอียดอยู่ในบทที่ 3) มาตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) โดยโปรแกรม ANSYS FLUENT 15.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ (Commercial program) ที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายสำหรับการศึกษาการจำลองลักษณะการไหลรูปแบบต่างๆ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมนั้นจะทำการเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของงานวิจัยที่เคยมีผู้ศึกษาได้ทำการทดลองมาก่อนหน้านี้ เพื่อให้มีความมั่นใจว่าการใช้งานโปรแกรมมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือพอที่สามารถนำไปเพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาการไหลได้ สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะทำแบ่งการตรวจสอบความถูกต้องออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิสเตอร์ และส่วนที่สองจะเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการไหลแบบปั่นป่วน และการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิสเตอร์ สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม เพื่อศึกษาลักษณะการไหล ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน และค่าความดันตกคร่อม จะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4] ที่มีอยู่แล้ว

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิสเตอร์

สำหรับการศึกษาการวิเคราะห์ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อน รวมไปถึงความดันตกคร่อมตลอดความยาวของท่อกลม จะทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4] ซึ่งทำการจำลองการไหลในสามมิติ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศที่ไหลเข้าสู่ท่อกลมและไหลผ่านวงแหวนเทอร์มิสเตอร์ โดยจะพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหลและลักษณะการไหลที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ สำหรับลักษณะรูปร่าง และพารามิเตอร์ของเทอร์มิสเตอร์แบบต่างๆ (แสดงรายละเอียดอยู่ในบทที่ 1) โดยขั้นตอนแรกจะทำการสร้างกริด (Grid generation) เพื่อแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ทำการเลือกจำนวนกริด (Grid number) ที่เหมาะสมที่ใช้ในการคำนวณ

ลักษณะของปัญหาในการไหล โดยจะใช้กริดที่มีความละเอียดแบบสม่ำเสมอตลอดทั้งโดเมนการไหล เพื่อให้ผลลัพธ์ในการคำนวณมีความถูกต้องด้วยวิธีการทดสอบ Grid independency เมื่อทำการตัดสินใจเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสมแล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการหาผลลัพธ์สำหรับการคำนวณเพื่อไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

สำหรับการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีขั้นตอนในการหาผลเฉลยโดยการใช้ระเบียบวิธี TDMA ร่วมกับขั้นตอนวิธี SIMPLE [31] เพื่อให้แน่ใจว่าผลเฉลยที่ได้มีความถูกต้องไม่ผิดไปจากลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นจริง สำหรับการแก้ปัญหาระบบสมการระหว่างความดันและความเร็ว (Pressure-velocity coupling) และใช้ QUICK scheme ทำการกระจายพจน์ของการพา (Convection term) โดยที่ QUICK scheme เป็น Differencing Scheme ที่มีความถูกต้องในอันดับที่สอง (2^{nd} order scheme) ซึ่งทำให้ทำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำมากขึ้น (รายละเอียดอยู่ในบทที่ 3)

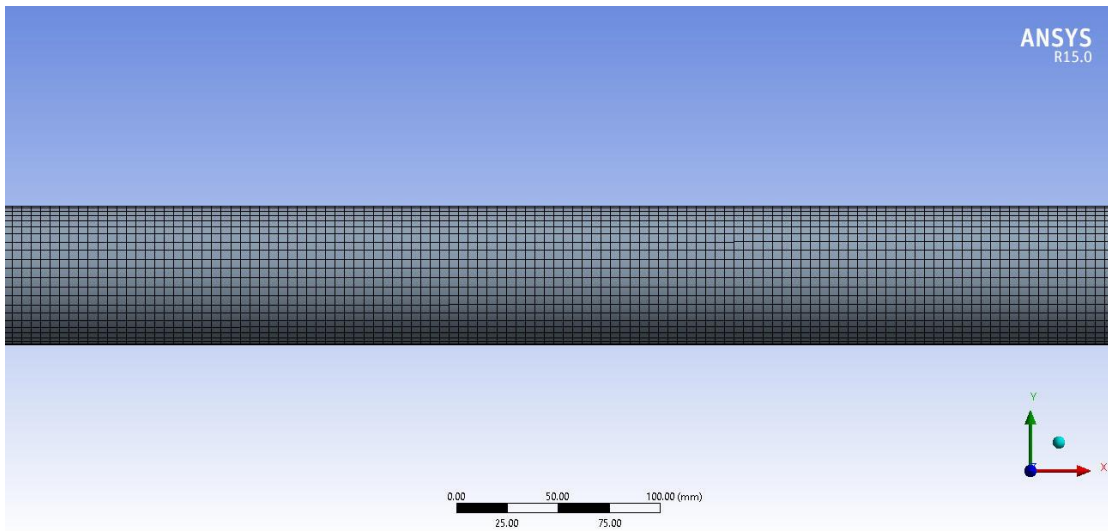
4.1.1 การสร้างกริดของขอบเขตในการวิจัย (Grid generation)

สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขกับผลการทดลองของ Kongkai paiboon et al. [4] ซึ่งทำการจำลองการไหลในสามมิติในกรณีการไหลภายในท่อกลมผ่านเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม จะทำการสร้างโครงสร้างกริด เลือกสร้างแบบที่ขนาดของรูปทรงในแต่ละส่วน โดยทำการเปรียบเทียบขนาดของกริดดังแสดงในตารางที่ 4.1

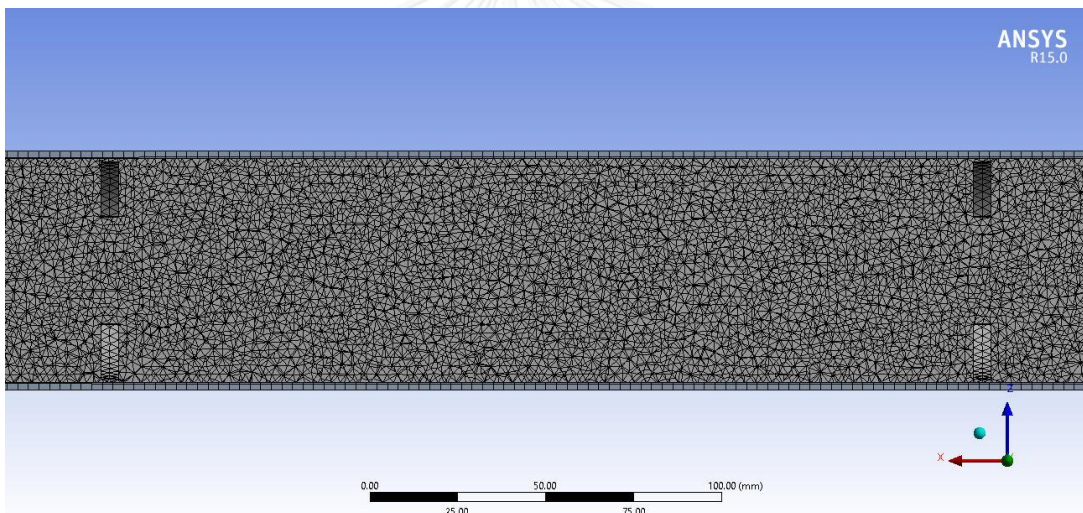
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบรูปโครงสร้างของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กับขนาดของกริด (Grid number)

Case	Type	DR	PR	Grid size (mm)	Grid number
1	CRT	0.5	4	4.5	559,315
2	CRT	0.5	4	4	623,489
3	CRT	0.5	4	3	1,184,996

จากตารางที่ 4.1 ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนประเภทวงกลม (CRT) โดยกำหนด Grid size เท่ากับ 3 เท่าๆกันในทุกมิติแต่ละเซลล์ (กรณีที่ 3) จะได้จำนวนของกริดเท่ากับ 1,184,996 ซึ่งพบว่าลักษณะของกริดมีความละเอียดค่อนข้างมาก แสดงดังรูปที่ 4.1



(ก) ลักษณะของกริดบริเวณผนังภายนอกของท่อกลม (กริดรูปแบบสี่เหลี่ยม)



(ข) ลักษณะของกริดบริเวณที่ของไหลไหลผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ภายในของท่อกลม
(กริดรูปแบบสามเหลี่ยม)

รูปที่ 4.1 กริดที่ใช้ในการคำนวณสำหรับปัญหาในการไหล โดยมี Grid size เท่ากับ 3 มิลลิเมตรเท่าๆ กันในทุกมิติแต่ละเซลล์

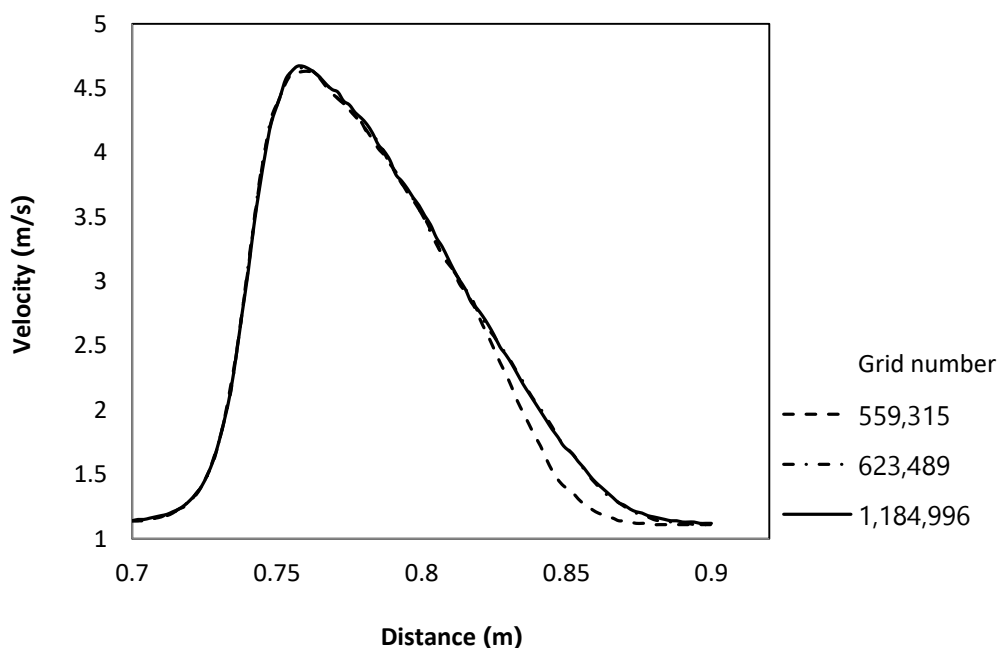
(ก) ลักษณะของกริดบริเวณผนังภายนอกของท่อกลม (กริดรูปแบบสี่เหลี่ยม)

(ข) ลักษณะของกริดบริเวณที่ของไหลไหลผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ภายในของท่อกลม
(กริดรูปแบบสามเหลี่ยม)

รูปที่ 4.1 แสดงกริดที่ใช้ในการคำนวณสำหรับปัญหาในการไหลโดยเริ่มจากการแทนลักษณะรูปร่างของปัญหาด้วยกริดขนาดเล็กทำให้การสร้างโดเมนของการคำนวณมีความแม่นยำมากขึ้น รูปที่ 4.1 (ก) แสดงการสร้างกริดรูปแบบสี่เหลี่ยมที่บริเวณผนังภายนอกของท่อกลม โดยกริดรูปแบบสี่เหลี่ยมแสดงถึงขอบเขตของโดเมนที่ใช้ในการคำนวณค่าฟังก์ชันความร้อนตลอดแนวความยาวของผนังท่อกลม ซึ่งการสร้างกริดรูปแบบสี่เหลี่ยมนี้เพียงพอต่อการคำนวณค่าฟังก์ชันความร้อนของท่อกลม รูปที่ 4.1 (ข) แสดงการสร้างกริดรูปแบบสามเหลี่ยมของของไหลบริเวณภายในท่อกลม โดยการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะต้องแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ซึ่งการสร้างกริดรูปแบบสามเหลี่ยมนี้สามารถแทนส่วนโค้งของท่อได้ดีกว่ารูปแบบสี่เหลี่ยม เนื่องจากความซับซ้อนของการไหลภายในท่อกลมเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการติดตั้งเทอร์มิสเตอร์ ดังนั้นขนาดของกริดภายในท่อกลมจึงมีขนาดเล็ก และละเอียดมากเพื่อนำไปสู่ความแม่นยำของผลลัพธ์ภายในท่อกลม

4.1.2 การทดสอบ Grid independency

การทดสอบ Grid independency ทำให้ทราบถึงความเหมาะสมที่สุดใน การทำการสร้างกริด (Grid generation) ที่ใช้ในการทดสอบสนามการไหลที่เหมาะสมมากที่สุด จากตารางที่ 4.1 จะทำการทดสอบกริดทั้งหมด 3 กรณีโดยจำนวนกริดทั้งหมด 3 ค่าคือ 559,315, 623,489 และ 1,184,996 ตามลำดับ โดยการทดสอบ Grid independency แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การทดสอบ Grid independency ที่บริเวณทางเข้าและทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ สำหรับที่ $Re=4,000$

รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากขนาดของกริดเท่ากับ 623,489 และ 1,184,996 มีความใกล้เคียงกันอย่างมาก แต่เนื่องจากขนาดของกริดที่แตกต่างกันทำให้มีผลต่อระยะเวลาในการคำนวณมาก จึงทำการตัดสินใจเลือกขนาดกริดเท่ากับ 623,489 ไปคำนวณเพื่อเปรียบเทียบค่า Nusselt number เฉลี่ย และค่าความดันตกคร่อมกับผลการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4]

4.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบของปัญหา (Boundary conditions)

สำหรับระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขในการหาผลเฉลยลักษณะของปัญหาจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขขอบของบริเวณที่ต้องการจำลองปัญหานั้นๆ โดยจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะทางกายภาพและตัวแปรต่างๆที่เราสนใจ การกำหนดเงื่อนไขขอบในรูปแบบต่างๆ สำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบไปด้วย 4 เงื่อนไขขอบซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

4.1.3.1 เงื่อนไขขอบบริเวณทางเข้า

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบที่บริเวณทางเข้าจะมีค่าตัวแปรสำหรับการไหลทุกตัวถูกกำหนดที่ทางเข้าได้แก่ u, v, w, T, k และ ε โดยค่าที่กำหนดจะเป็นไปตามผลการทดลองก่อนหน้านี้หรือการประมาณค่าตามลักษณะของปัญหา

4.1.3.2 เงื่อนไขขอบบริเวณทางออก

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบที่บริเวณทางออก ถ้าบริเวณทางออกที่พิจารณาไม่มีผลกระทบต่อกรไหล โดยมีลักษณะการไหลแบบเต็มรูป (Fully developed flow) และจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามทิศการไหลอีกต่อไป กล่าวคือ ค่าของตัวแปรต่างๆจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามทิศทางการไหล ในที่นี้จะใช้เงื่อนไขเกรเดียนต์ความดันบริเวณทางออกเป็นศูนย์ (Zero pressure gradient) ทำให้ได้เงื่อนไขขอบบริเวณทางออกดังนี้

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{exit} = 0 \quad (4.1)$$

4.1.3.3 เงื่อนไขขอบบริเวณผนังท่อ

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบบริเวณผนังท่อกลมสามารถแบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไขขอบ คือ

- 1) เงื่อนไขขอบบริเวณผนังท่อด้านใน
- 2) เงื่อนไขขอบบริเวณผนังท่อด้านนอก

1) เงื่อนไขขอบบริเวณผนังท่อด้านใน

เงื่อนไขแบบที่ของไหลไม่เกิดการไหล (No-slip condition) เป็นเงื่อนไขขอบที่ส่วนของความเร็วที่บริเวณขอบของผนังมีค่าเท่ากับศูนย์ ($u, v,$ และ $w = 0$) ซึ่งนั่นหมายความว่า จะไม่มีการคำนวณสมการโมเมนตัมที่บริเวณขอบผนังท่อกลมของปริมาตรควบคุมที่ติดกับผนัง

2) เงื่อนไขขอบบริเวณผนังท่อด้านนอก

เงื่อนไขขอบที่กำหนดให้ฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่บริเวณผนังท่อด้านนอก เพื่อให้เกิดความสอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์พลังงาน โดยฟลักซ์ความร้อนที่ออกจากของผนังของท่อกลมจะต้องเท่ากับฟลักซ์ความร้อนที่ไหลเข้าสู่ของไหล $q_w = q_f$ โดยที่ $q = -k \frac{\partial T}{\partial x}$ ดังนั้น จะได้เงื่อนไขขอบของการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณผนังของท่อกลมและของไหลแสดงได้ดังนี้

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\text{wall}} = -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\text{fluid}} \quad (4.2)$$

4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลแบบปั่นป่วน และการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิสเตอร์

การหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จะมีตัวแปรสำคัญที่บ่งบอกถึงความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อน คือ

1. คำน้สเซลสนัมเบอร์เฉลี่ย (Average Nusselt number, Nu)
2. ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor, f)
3. ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer performance, η)

4.2.1 คำน้สเซลสนัมเบอร์เฉลี่ย (Average Nusselt number, Nu)

คำน้สเซลสนัมเบอร์เฉลี่ย (Average Nusselt number, Nu) เป็นค่าตัวแปรสำคัญที่ใช้บ่งบอกประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (4.3)$$

โดยที่ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (Average heat transfer coefficient)

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter)

k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (Average heat transfer coefficient, h) สามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผนังท่อกลมกับของไหลภายในท่อกลม สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q = hA(T_w - T_f) \quad (4.4)$$

โดยที่ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer rate)

A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนตลอดความยาวของท่อกลม (Heat transfer area)

$(T_w - T_f)$ คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผนังท่อกลมกับของไหลภายในท่อกลม

สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมทำโดยประยุกต์ใช้สมการของ Dittus and Boelter [32] ที่หาค่าตัวเลขสัมประสิทธิ์สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเต็มรูป (Fully-turbulent flow) ของของไหลที่ไหลผ่านท่อกลมผิวเรียบที่ค่า $Re > 10,000$ จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \begin{cases} n=0.3; (T_s < T_m) \\ n=0.4; (T_s > T_m) \end{cases} \quad (4.5)$$

4.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor, f)

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นแฟกเตอร์ที่บ่งบอกถึงลักษณะแรงเสียดทานของของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวสัมผัสที่เกิดจากความเค้นเฉือนระหว่างของไหลกับผนังท่อกลม โดยมีความสัมพันธ์กับค่าความดันตกคร่อมภายในท่อกลมดังนี้

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{u_m^2}{2} \rho \quad (4.6)$$

โดยที่ ΔP คือ ความดันตกคร่อม (Pressure drop)

f คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor)

u_m คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (Mean velocity)

L คือ ความยาวของท่อกลมที่ของไหลไหลผ่าน (Length of pipe)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกลม (Inner diameter of the pipe)

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (Density of fluid)

สมการของ Blasius [33] สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพื่อนำไปตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ที่โดยที่ของไหลไหลผ่านท่อกลมผิวเรียบที่ค่า $3,000 < \text{Re} < 20,000$ จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$f = 0.316 \text{Re}^{-0.25} \quad (4.7)$$

4.2.3 ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer performance, η)

ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเป็นค่าที่ใช้บอกถึงความสามารถของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรืออุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายเทความร้อนรูปแบบต่างๆ โดยค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน หรือประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรคือ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer rate, Q) และค่าความดันตกคร่อม (Pressure drop, ΔP) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสำหรับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์กับท่อกลมผิวเรียบจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left(\frac{Q_t}{Q_p} \right) = \left(\frac{\text{Nu}_t}{\text{Nu}_p} \right) = \left(\frac{\text{Re}_t}{\text{Re}_p} \right) \quad (4.8)$$

โดยทั้งสามตัวแปรนี้จะมีค่าแปรผันตามกัน กล่าวคือ เมื่อค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่านัสเซลสันนัมเบอร์เพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาที่สภาวะกำลังขับ (Pumping power, P) เดียวกัน สามารถเขียนในพจน์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ได้ดังนี้

$$(f \text{Re}^3)_t = (f \text{Re}^3)_p \quad (4.9)$$

ทำการจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\left(\frac{\text{Re}_t}{\text{Re}_p} \right) = \left(\frac{f_t}{f_p} \right)^{\frac{1}{3}}$$

สำหรับค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer performance, η) คืออัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์กับค่าสัมประสิทธิ์การพา

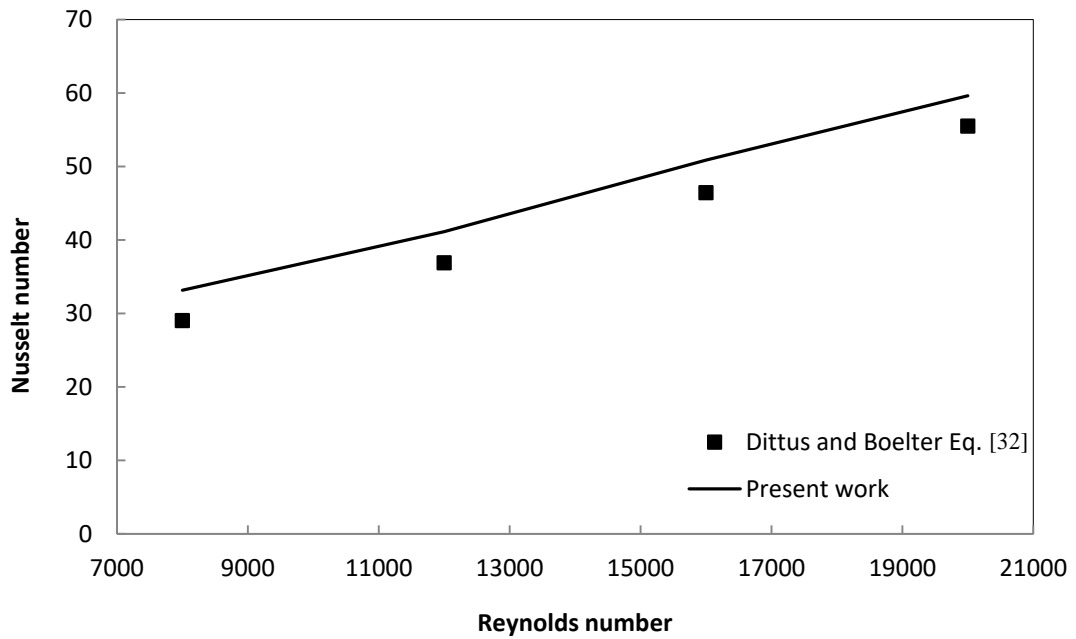
ความร้อนเฉลี่ยของท่อกลมผิวเรียบที่กำลังขับเดียวกัน (อ้างอิงจาก Webb [34]) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\eta = \frac{h_t}{h_p} \Big|_{pp} = \frac{Nu_t}{Nu_p} \Big|_{pp} = \left(\frac{Nu_t}{Nu_p} \right) \left(\frac{f_t}{f_p} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (4.10)$$

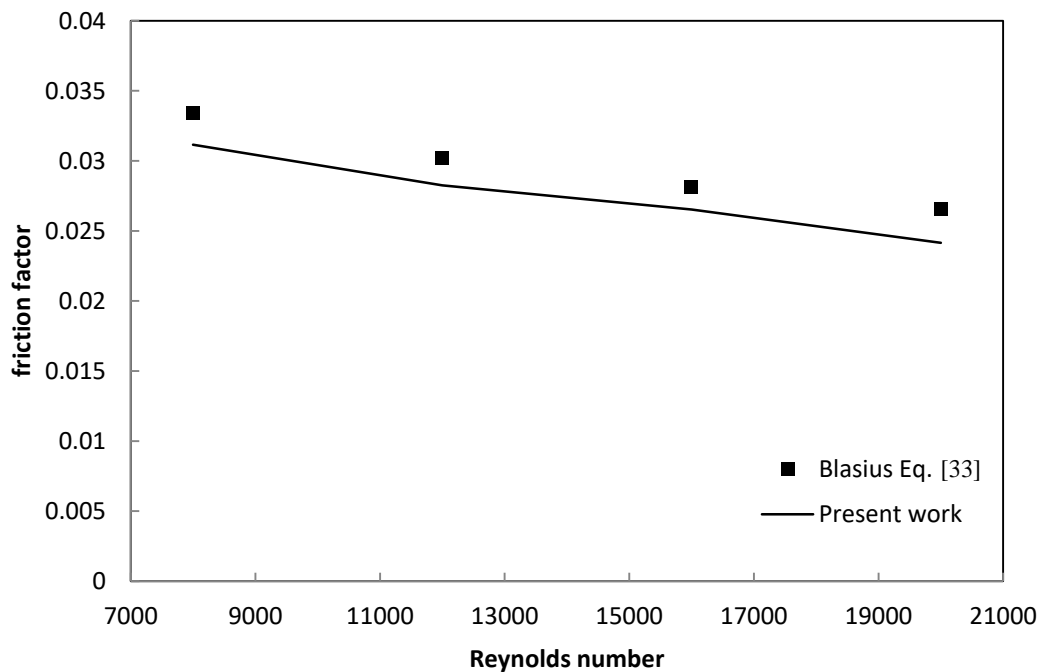
กล่าวคือ ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเป็นแฟกเตอร์ที่บ่งบอกถึงการประสิทธิผลการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากเป็นอัตราส่วนของแฟกเตอร์ทั้งสองตัวคือ อัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์กับท่อกลมผิวเรียบ (Nu_t / Nu_p) และอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์กับท่อกลมผิวเรียบ (f_t / f_p) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงได้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดังนี้

$$\eta = \frac{(Nu_t / Nu_p)}{(f_t / f_p)^{1/3}} \quad (4.11)$$

สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์สิ่งกีดขวาง หรือเทอร์บิวเลเตอร์เพื่อใช้ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ควรมีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer performance, η) มากกว่าหนึ่งเท่าของท่อผิวเรียบขึ้นไป ($\eta > 1$) ถ้ามีค่าน้อยกว่าหนึ่งเท่าของท่อผิวเรียบลงไป ($\eta < 1$) ก็ไม่คุ้มกับการออกแบบขึ้นรูปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเทอร์บิวเลเตอร์ (อ้างอิงจาก Webb [34]) ทั้งนี้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสามารถบ่งบอกถึงการเลือกลักษณะรูปร่างของเทอร์บิวเลเตอร์ รวมไปถึงการเลือกอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางและอัตราส่วนระยะห่างของเทอร์บิวเลเตอร์ได้

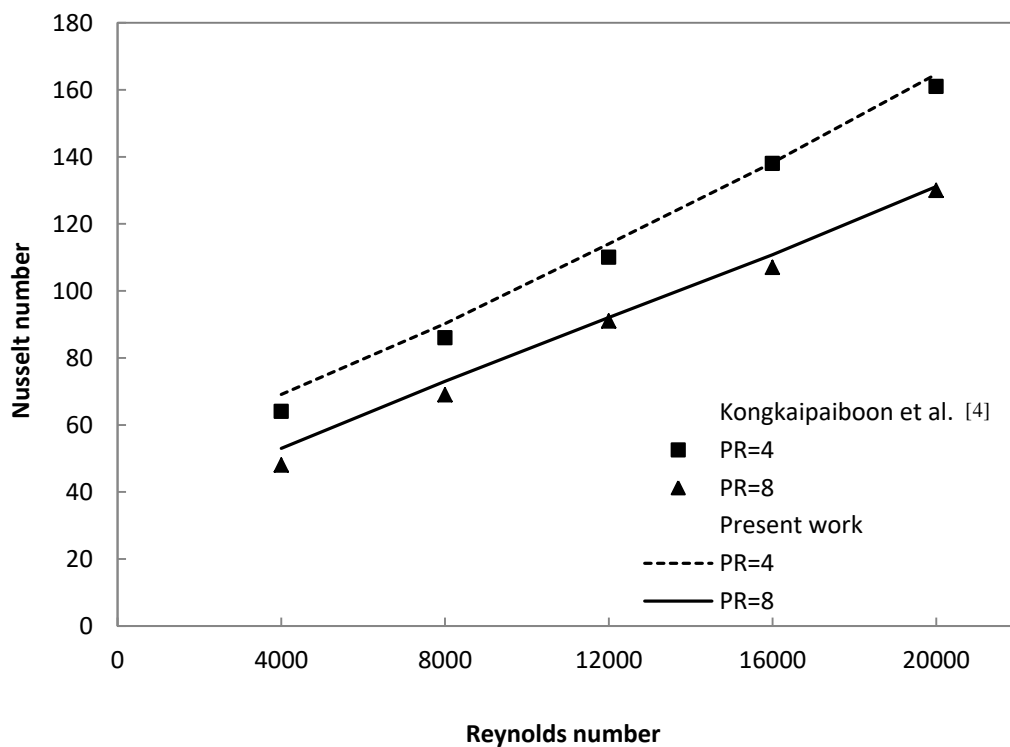


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณค่าตัวเลขสัณฐานเบอร์เฉลี่ยที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ กับค่าที่ได้จากสมการของ Dittus and Boelter [32] สำหรับท่อกลมผิวเรียบ



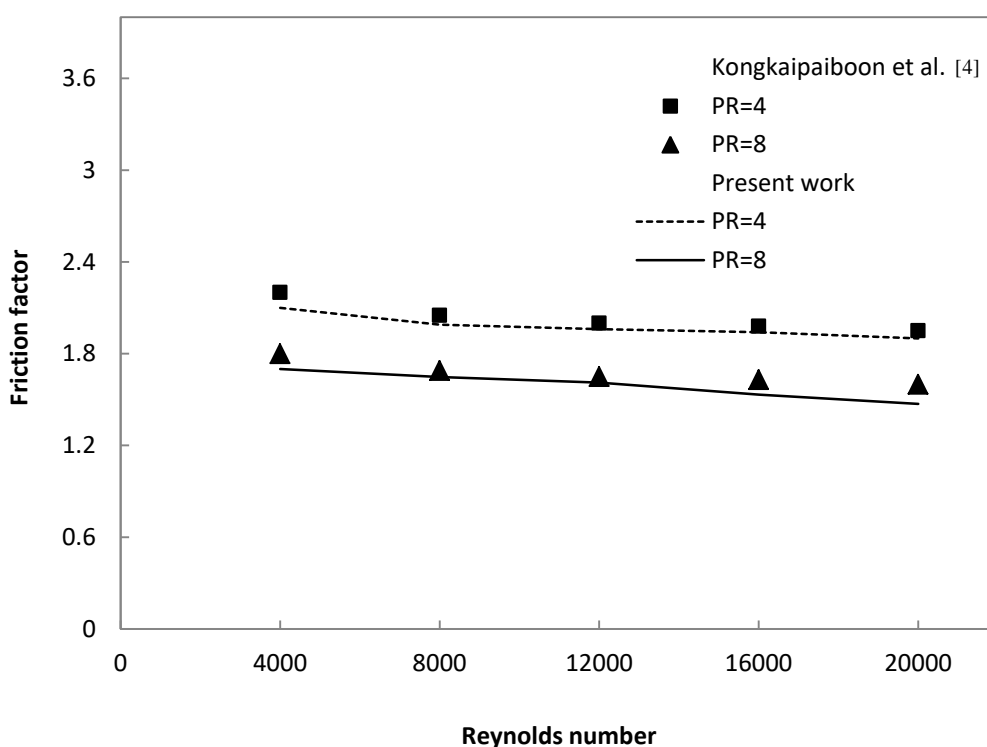
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ กับค่าที่ได้จากสมการของ Blasius [33] สำหรับท่อกลมผิวเรียบ

รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณของค่าตัวเลขสเตรสสัมเบอร์เฉลี่ยที่ค่าเรย์โนลด์สสัมเบอร์ต่างๆ กับสมการของ Dittus and Boelter [32] ในท่อกลมผิวเรียบโดยไม่มีการติดตั้งเทอร์บิวเตอร์ พบว่าผลการคำนวณค่าตัวเลขสเตรสสัมเบอร์เฉลี่ยมีความใกล้เคียง และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับสมการของ Dittus and Boelter [32] เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ค่าเรย์โนลด์สสัมเบอร์ต่างๆ กับสมการของ Blasius [33] ในท่อกลมผิวเรียบ พบว่าผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีความใกล้เคียง และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับสมการของ Blasius [33] จากผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขทำให้ทราบว่า โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณมีความน่าเชื่อถือสามารถนำมาใช้คำนวณได้



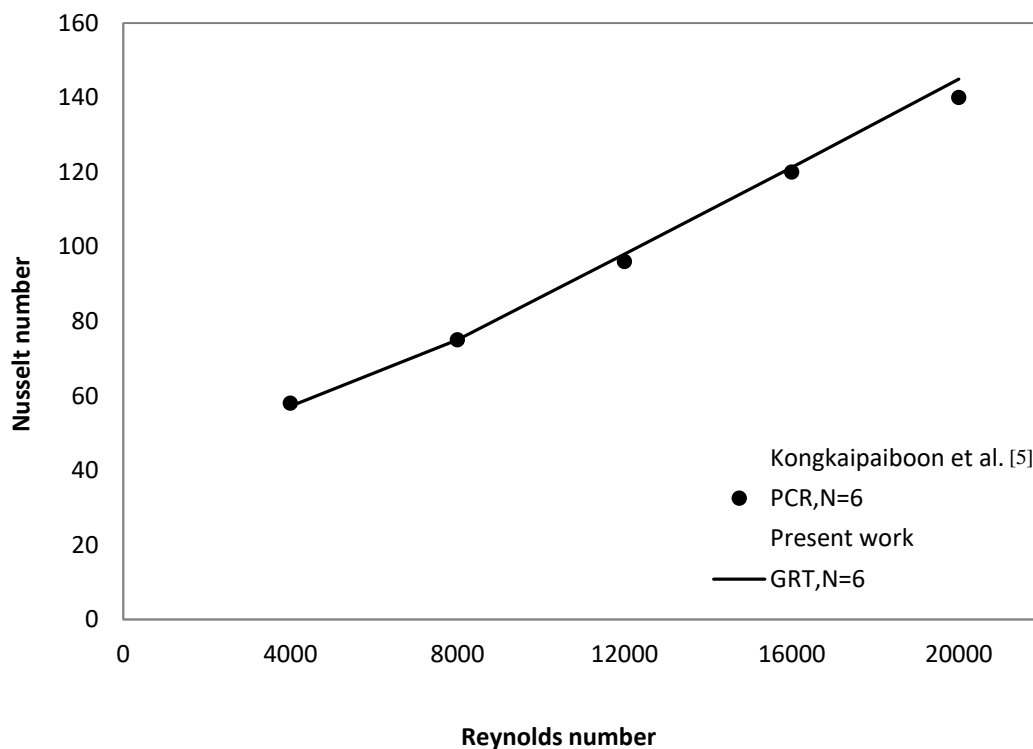
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณค่าตัวเลขสเตรสสัมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์สสัมเบอร์กับผลการทดลองของ Kongkaipaiboon et al. [4] สำหรับกรณีของ CRT ที่ค่า $DR = 0.5$, $PR = 4$ และ 8

รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสเกลสลิปเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์สกับผลการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4] จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าของค่าตัวเลขสลิปเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น และพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการคำนวณมีความใกล้เคียงและมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง



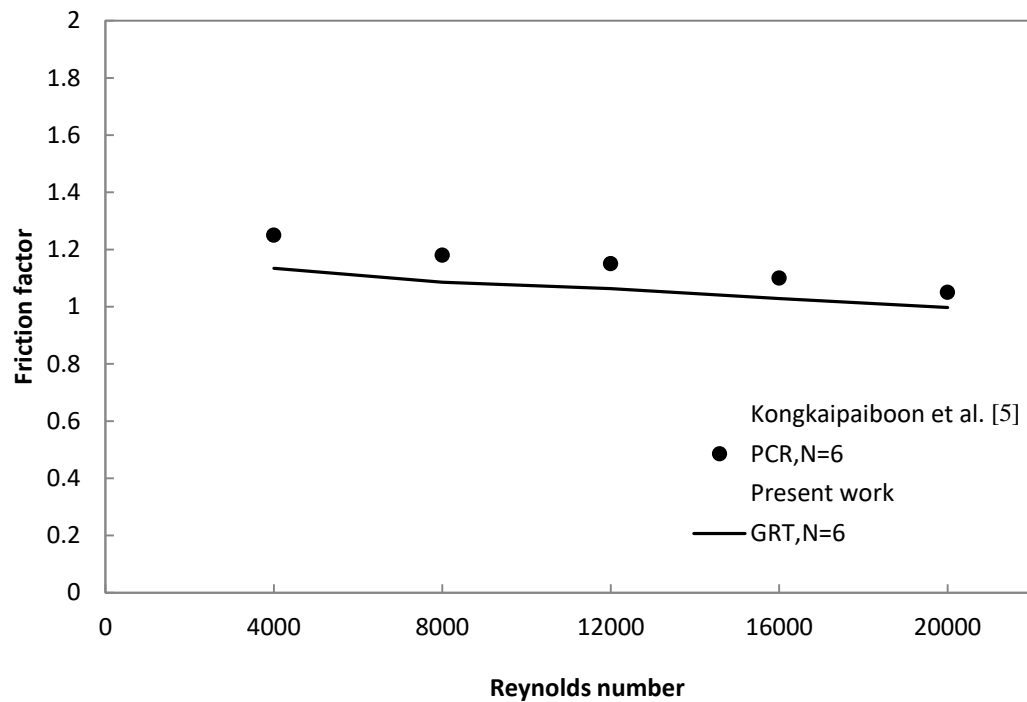
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์สกับผลการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4] สำหรับกรณีของ CRT ที่ค่า $DR = 0.5$, $PR = 4$ และ 8

รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์สกับผลการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4] พบว่า เมื่อค่าเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง และพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการคำนวณมีความใกล้เคียงและมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณค่าตัวเลขสแนมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์กับผลการทดลองของ Kongkai paiboon et al. [5] สำหรับกรณีของ PCR และ GRT ที่ค่า $DR = 0.5$ และ $PR = 4$

รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสแนมเบอร์กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์กับผลการทดลองของ Kongkai paiboon et al. [5] โดยการทดลองนั้นทำการเจาะรูบริเวณรอบพื้นผิวของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (Perforated conical ring, PCR) โดยมีจำนวนรูที่ถูกเจาะ (N) เท่ากับ 6 และทำการเปรียบเทียบกับกรณีคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (Gear ring turbulators, GRT) โดยมีจำนวนช่องที่ถูกตัดออก (N) เท่ากับ 6 พบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการคำนวณมีความใกล้เคียงและมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ กับผลการทดลองของ Kongkaipaiboon et al. [5] สำหรับกรณีของ PCR และ GRT ที่ค่า $DR = 0.5$ และ $PR = 4$

เช่นเดียวกับกับรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์กับการทดลองของ Kongkaipaiboon et al. [5] พบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการคำนวณมีความใกล้เคียงและมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง สำหรับเทคนิคการเจาะรูเพื่อลดค่าความดันตกคร่อม ทำให้สามารถมาประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยการตัดบางส่วนออก (Cut-out) ได้

4.3 สรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

จากการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS FLUENT 15.0 สำหรับผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลองของผู้ที่ทำการศึกษาในอดีตแล้วพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้ออกมามีความใกล้เคียงที่ยอมรับได้ และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้มีความมั่นใจในระดับหนึ่งว่าการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น สามารถให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือพอที่จะใช้ในการศึกษาต่อไป



บทที่ 5

ผลลัพธ์จากการคำนวณและการวิเคราะห์

หลังจากที่ทำการตรวจสอบความถูกต้องด้วยโปรแกรมที่ส่งผลให้การคำนวณมีความถูกต้องแม่นยำเพียงพอแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) สำหรับการไหลของของไหลแบบสามมิติภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT VERSION 15.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ (Commercial program) ที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายสำหรับการศึกษาการจำลองลักษณะการไหลรูปแบบต่างๆ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ของอากาศ โดยที่อากาศไหลเข้าสู่ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบตามที่ได้กำหนดไว้ โดยจะตั้งสมมติฐานว่าของไหลที่นำมาพิจารณามีคุณสมบัติต่อไปนี้

- 1) การไหลเป็นแบบปั่นป่วน
- 2) คุณสมบัติต่างๆของของไหลมีค่าคงที่ตลอดทั้งขอบเขตที่พิจารณา
- 3) การไหลอยู่ในสภาวะคงตัวและเป็นชนิดอัดตัวไม่ได้
- 4) การไหลเกิดใน 3 มิติ

สำหรับการศึกษาค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของเทอร์บิวเลเตอร์ และท่อกลม จะพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย

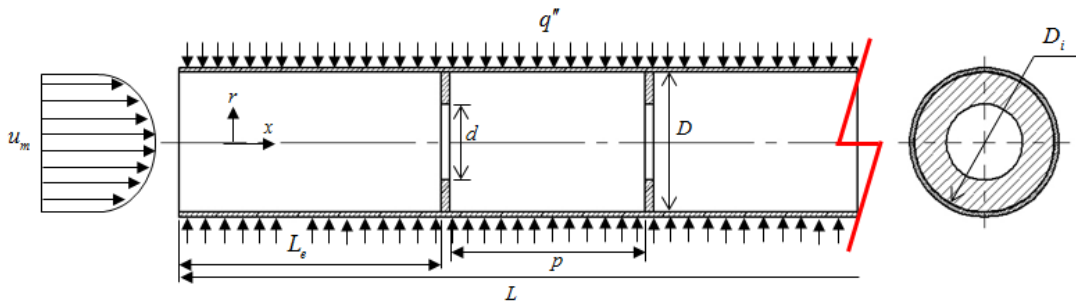
- 1) ลักษณะของปัญหา
- 2) ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า DR และค่า PR
- 3) การถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์
- 4) ความดันตกคร่อมภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์
- 5) การเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนโดยการปรับปรุงรูปร่างของเทอร์บิวเลเตอร์
- 6) ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์
- 7) การเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์

5.1 ลักษณะของปัญหา

ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่ตั้งตั้งเทอร์บิวเลเตอร์นี้ ได้ใช้ข้อมูลจากการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [4] โดยลักษณะของปัญหาได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.1 โดยท่อกลมนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D_i = 63$ mm มีความยาว $L = 1.5$ m และความหนาเท่ากับ 2 มิลลิเมตร โดยอากาศจะไหลเข้าสู่ท่อกลม และไหลผ่านเทอร์บิวเลเตอร์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ $D = 62$ mm โดยมีค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter ratio, $DR = d/D = 0.5D, 0.6D$ และ $0.7D$) และอัตราส่วนระยะห่าง (Pitch ratio, $PR = P/D = 4D$ และ $8D$) โดยข้อมูลของการทดลองมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลต่างๆ ที่ใช้สำหรับการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่ตั้งตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ

Tube Characteristics	
Tube length, L (m)	1.5
Tube diameter, D_i (mm)	63
Turbulators diameter, D (mm)	62
Inlet Fluid Properties	
Fluid	Air
Temperature (K)	273
Density (Kg/m^3)	1.1765
Viscosity ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)	1.8538×10^{-5}
Specific heat ($\text{KJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)	1.0063×10^3
Thermal Conductivity ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	0.02612
Flow Condition	
Reynolds number	4,000 – 20,000



รูปที่ 5.1 ลักษณะของปัญหาสำหรับของไหลที่ไหลผ่านเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT)

ตารางที่ 5.2 ขนาดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับของไหลที่ไหลผ่านเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ

D (mm)	L_e (mm)	p (mm)	d (mm)
62	115	$4D$	$0.5D$
		$8D$	$0.6D$
			$0.7D$

กำหนดให้ค่าพลักซ์ความร้อน (q'') คงที่บริเวณผนังภายนอกตลอดความยาวของท่อกลม โดยมีหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้ (Variance transformer) จ่ายกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 5 แอมแปร์ เข้าสู่ผนังภายนอกตลอดความยาวของท่อกลม และกำหนดให้มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 220 โวลต์ สามารถคำนวณค่าพลักซ์ความร้อนได้ดังนี้

$$q'' = \frac{Q}{A} = \frac{VI}{\pi DL} = \frac{(220)(5)}{(\pi)(0.067)(1.5)} = 3,500 \text{ W} / \text{m}^2 \quad (5.1)$$

โดยที่ V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า

A คือ พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนตลอดความยาวของท่อกลม

ในการศึกษาผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลบริเวณทางเข้าของท่อกลมนั้นจะพิจารณาโดยใช้ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) สามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Re} = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (5.2)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

u_m คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศบริเวณทางเข้า

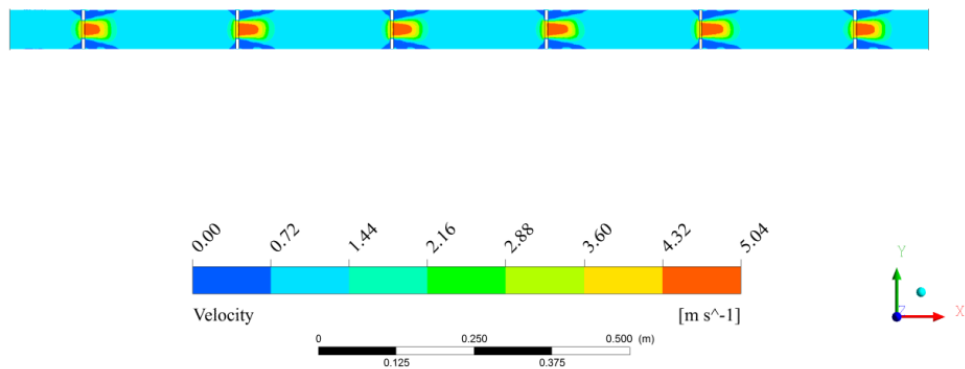
D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter)

μ คือ ความหนืดสมบูรณ์ของอากาศ

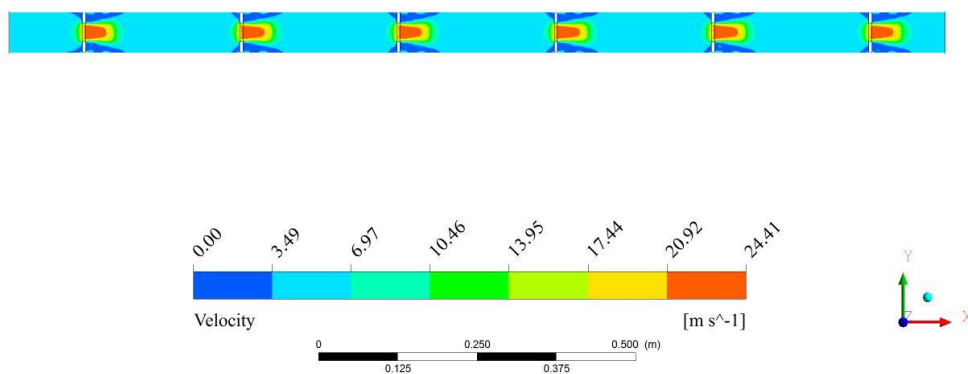
สำหรับการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศที่บริเวณทางเข้าของท่อกลม ใช้ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์อยู่ในช่วง 4,000 ถึง 20,000 เพื่อทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่มีผลกระทบกับการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์ภายในท่อกลม

5.2 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า DR และค่า PR

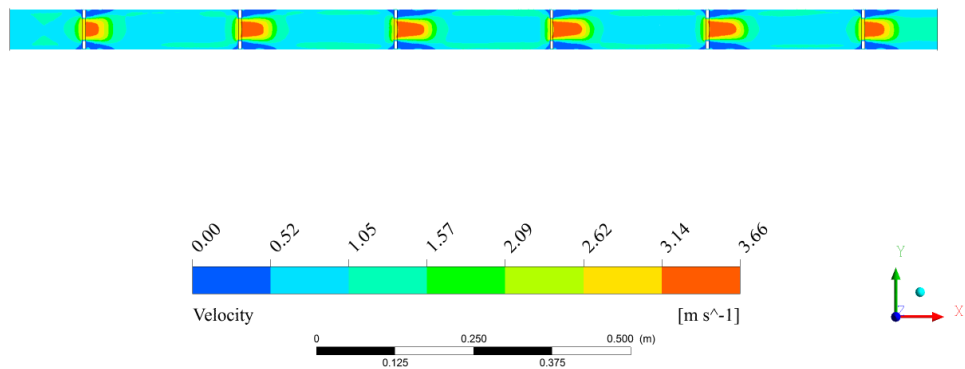
สำหรับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า DR และค่า PR โดยทำการเปรียบเทียบความเร็วที่บริเวณทางเข้าที่ค่า $\text{Re} = 4,000$ และ $20,000$ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากกรูปร่างความเร็ว (Velocity contour) แสดงดังรูปที่ 5.2 – 5.13 โดยการแสดงความเร็วให้อยู่ในลักษณะของกรูปร่างความเร็วนั้นเพื่อต้องการแบ่งช่วงของความเร็วในการไหลที่ชัดเจน เช่น บริเวณแถบสีแดงมีการเพิ่มระดับความเร็วที่บริเวณทางออกของเทอร์มิวเลเตอร์ และบริเวณแถบสีน้ำเงินมีการลดระดับความเร็วหรือไม่มีการไหลของของไหลผ่านบริเวณดังกล่าว

ANSYS
R15.0

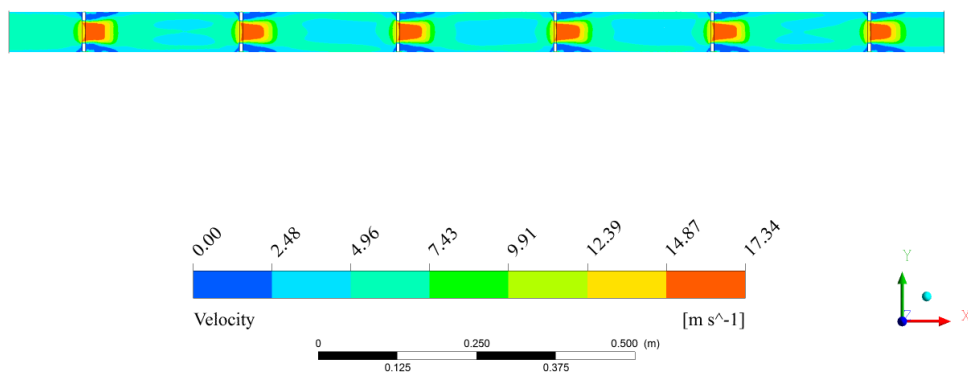
รูปที่ 5.2 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT)
กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 4,000

ANSYS
R15.0

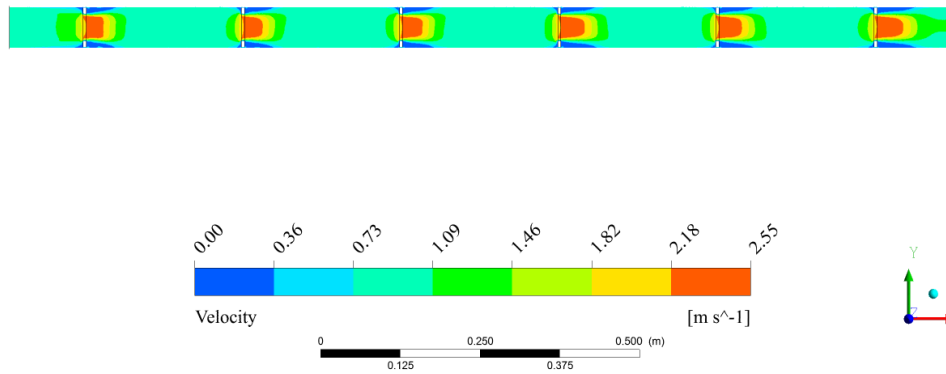
รูปที่ 5.3 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT)
กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000

ANSYS
R15.0

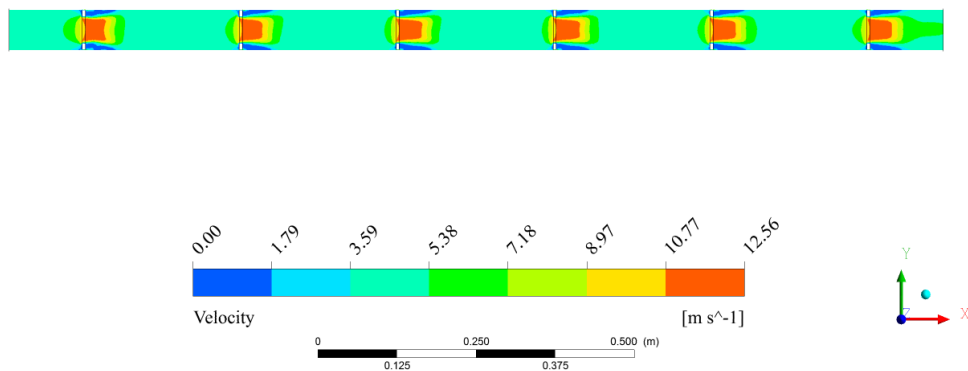
รูปที่ 5.4 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT)
กรณี DR = 0.6, PR= 4 ที่ค่า Re = 4,000

ANSYS
R15.0

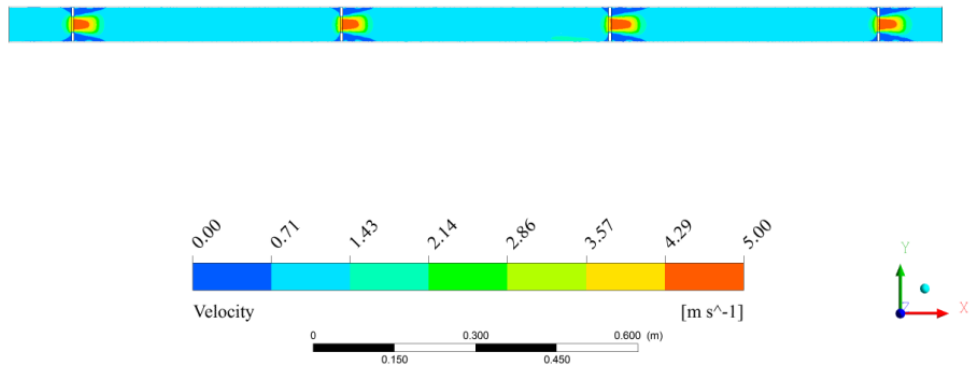
รูปที่ 5.5 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT)
กรณี DR = 0.6, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000

ANSYS
R15.0

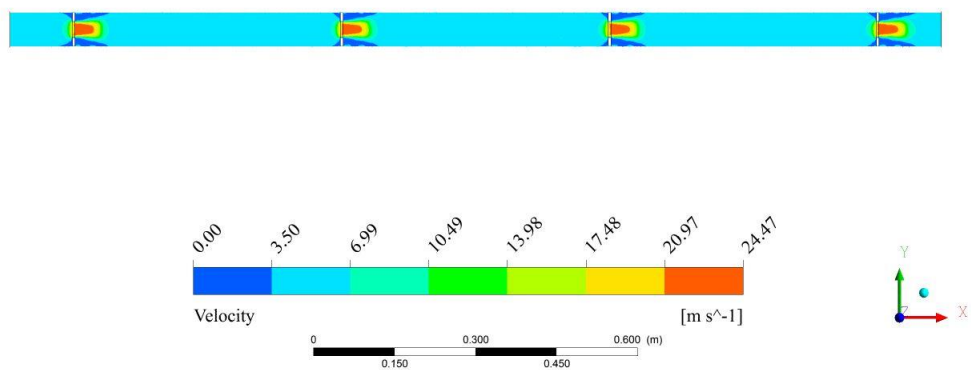
รูปที่ 5.6 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT)
กรณี DR = 0.7, PR= 4 ที่ค่า Re = 4,000

ANSYS
R15.0

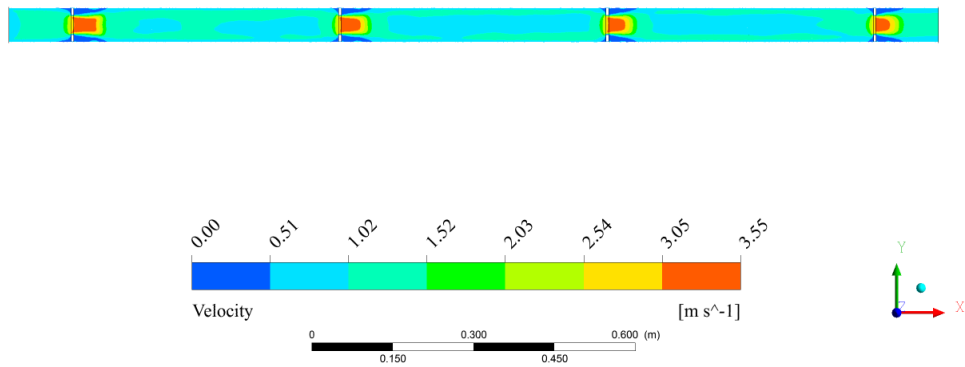
รูปที่ 5.7 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT)
กรณี DR = 0.7, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000

ANSYS
R15.0

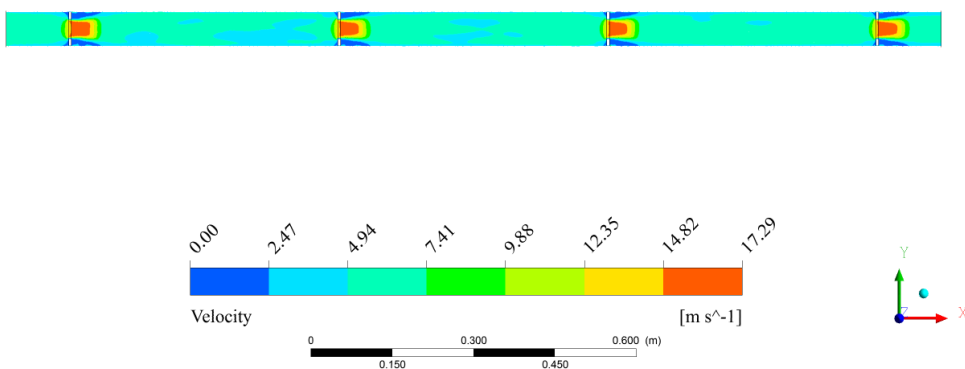
รูปที่ 5.8 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กโตรวงแหวนวงกลม (CRT)
กรณี DR = 0.5, PR= 8 ที่ค่า Re = 4,000

ANSYS
R15.0

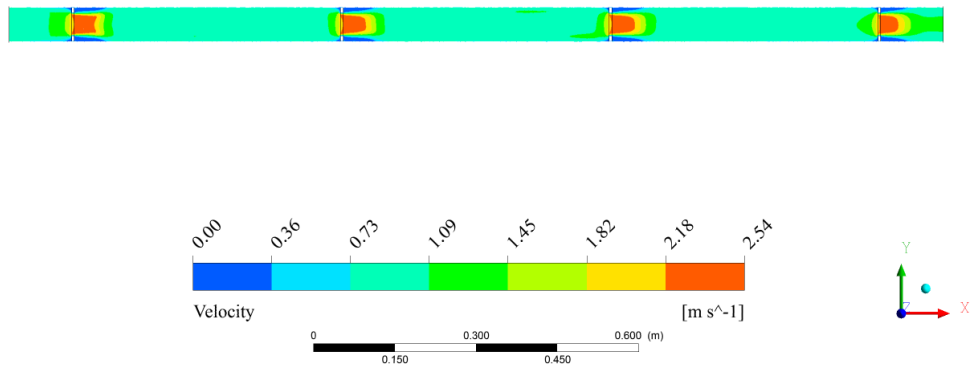
รูปที่ 5.9 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กโตรวงแหวนวงกลม (CRT)
กรณี DR = 0.5, PR= 8 ที่ค่า Re = 20,000

ANSYS
R15.0

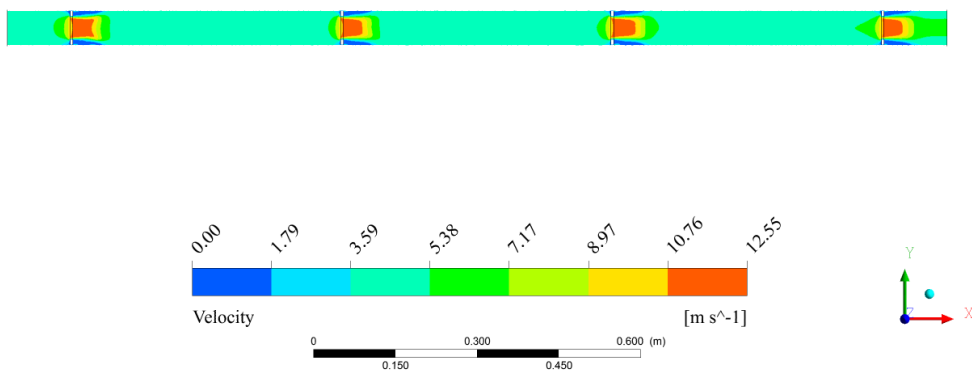
รูปที่ 5.10 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กโตรวุ้นแหวนวงกลม (CRT)
กรณี DR = 0.6, PR= 8 ที่ค่า Re = 4,000

ANSYS
R15.0

รูปที่ 5.11 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กโตรวุ้นแหวนวงกลม (CRT)
กรณี DR = 0.6, PR= 8 ที่ค่า Re = 20,000

ANSYS
R15.0

รูปที่ 5.12 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วังแหวนวงกลม (CRT)
กรณี DR = 0.7, PR= 8 ที่ค่า Re = 4,000

ANSYS
R15.0

รูปที่ 5.13 รูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วังแหวนวงกลม (CRT)
กรณี DR = 0.7, PR= 8 ที่ค่า Re = 20,000

รูปที่ 5.2 ถึง 5.7 แสดงผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่า DR กรณีของ CRT จะเห็นได้ว่าการเปรียบเทียบความเร็วที่บริเวณทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์กรณีที่มีค่า DR = 0.5, 0.6 และ 0.7 โดยกำหนดให้ค่า PR = 4 และ Re = 20,000 พบว่าความเร็วสูงสุดที่ทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์เท่ากับ 24.41 m/s, 17.34 m/s และ 12.56 m/s ตามลำดับ และเช่นเดียวกับรูปที่ 5.8 – 5.13 แสดงผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่า PR กรณีของ CRT จะเห็นได้ว่าการเปรียบเทียบความเร็วที่บริเวณทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์กรณีที่มีค่า PR = 4 และ 8 โดยกำหนดให้ค่า DR = 0.5 และ Re = 20,000 พบว่าความเร็วสูงสุดที่ทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์เท่ากับ 24.41 m/s และ 24.47 m/s ตามลำดับ

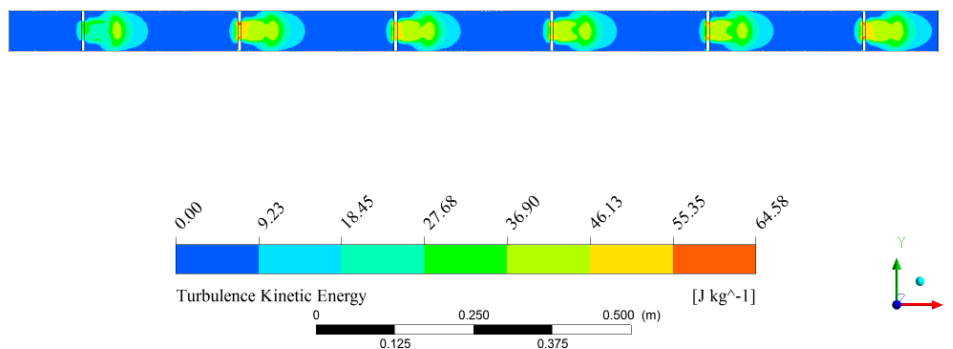
สามารถสรุปได้ว่า ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า DR มีอิทธิพลมากกว่าการเปลี่ยนแปลงค่า PR โดยพิจารณาความเร็วที่บริเวณทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์ และยังสามารถสรุปได้ว่า ผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลที่ทำให้ความเร็วบริเวณทางออกเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าระดับความแปรปรวน (Turbulent intensity) เพิ่มขึ้น

สำหรับค่าระดับความแปรปรวน (Turbulent intensity, I) คือ ระดับความเข้มของการไหลแบบปั่นป่วนนิยามโดยอัตราส่วนระหว่างคารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความเร็วในการแกว่งตัวสำหรับการไหล u' (Root-mean-square of the turbulent velocity fluctuations) กับความเร็วในการไหลเฉลี่ยของของไหล \bar{u} (The Mean Velocity)

$$I = \frac{u'}{\bar{u}} = 0.16(\text{Re})^{-\frac{1}{8}} \quad (5.3)$$

โดยที่
$$u' \equiv \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} = \sqrt{\frac{2}{3}k}$$

ดังนั้นเมื่อระดับความเร็วสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมเพิ่มขึ้นที่บริเวณทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์จะทำให้เกิดค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy, k) เพิ่มขึ้นที่บริเวณดังกล่าว (แสดงดังรูปที่ 5.14) โดยจะส่งผลให้ค่าระดับความแปรปรวนเพิ่มขึ้นด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การหาผลลัพธ์ของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ

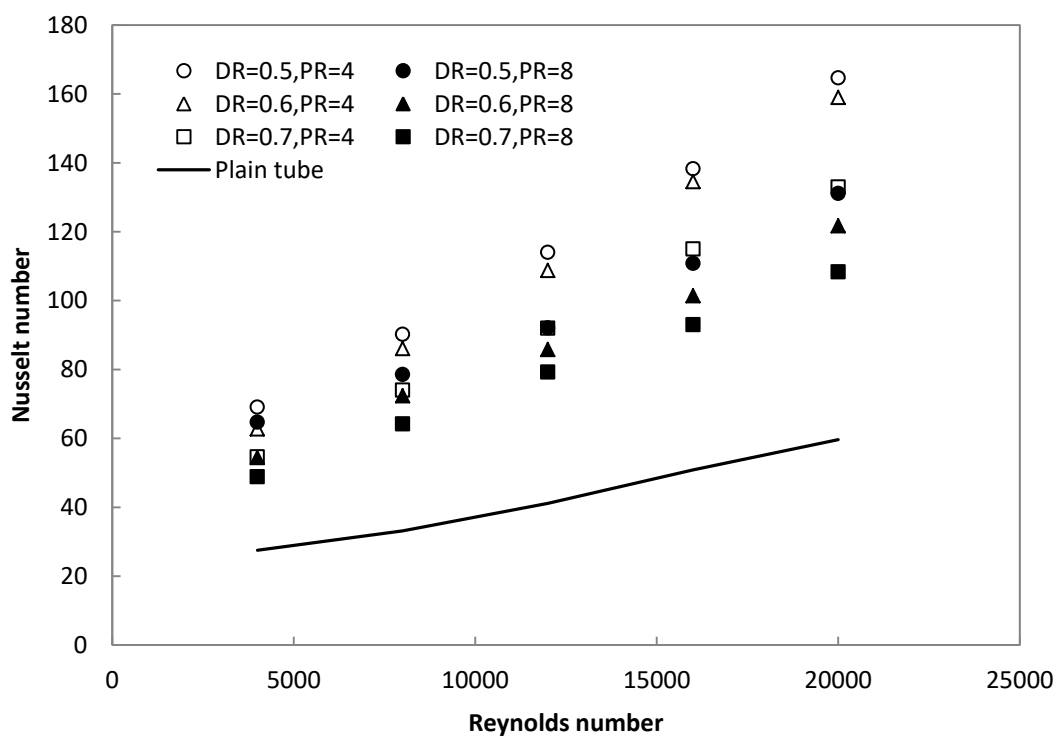


รูปที่ 5.14 รูปร่างพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000

รูปที่ 5.14 แสดงรูปร่างพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณีที่ค่า DR = 0.5 และค่า PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000 พบว่า บริเวณทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์จะมีอากาศไหลออกโดยมีค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณระยะห่างระหว่างเทอร์บิวเลเตอร์ ซึ่งส่งผลให้บริเวณทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์มีค่าระดับความปั่นป่วนสูงขึ้นตามค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน เนื่องจากความสัมพันธ์ของสมการ (5.3) กล่าวคือ ค่าระดับความปั่นป่วนจะมีค่าแปรผันตามกับค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

5.3 การถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์

สำหรับการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ ตัวแปรสำคัญหนึ่งที่น่าสนใจคือความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลกับผนังของท่อกลม ก็คือ ค่าตัวเลขสแนมเบอร์เฉลี่ย (Average Nusselt number, Nu) ซึ่งในที่นี้จะใช้ค่าดังกล่าวในการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ สำหรับการไหลของของไหลที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่างๆ

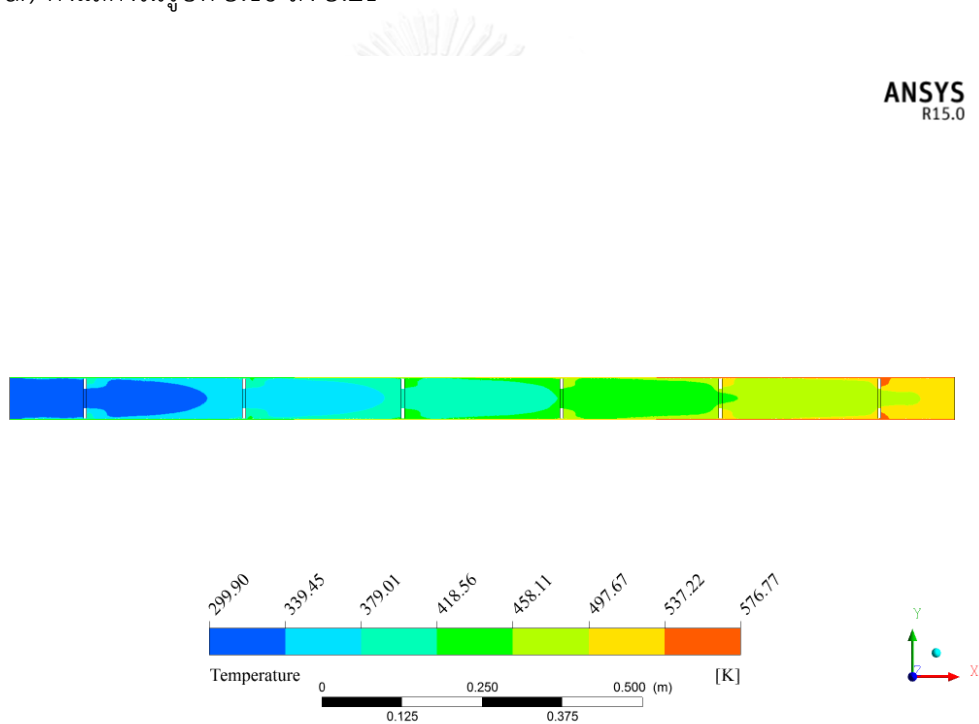


รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสแนมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT

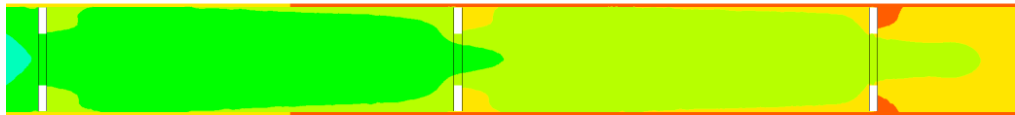
รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสแนมเบอร์เฉลี่ยที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ต่างๆ ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า $DR = 0.5, 0.6$ และ 0.7 และค่า $PR = 4$ และ 8 ผลจากการคำนวณสรุปว่า การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมกรณีนี้ที่ค่า DR และค่า PR น้อยที่สุด ($DR = 0.5$ และ $PR = 4$)

จะได้ค่าน้ำสเซลสนัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุด และยังพบว่าค่าน้ำสเซลสนัมเบอร์เฉลี่ยที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบวงแหวนวงกลมเพิ่มขึ้น 78% ถึง 187% เมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ

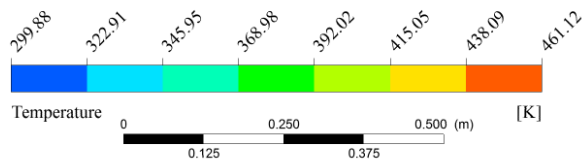
จะเห็นได้ว่า การเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงค่า DR และค่า PR กล่าวคือ ค่าน้ำสเซลสนัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีที่มีค่า DR และค่า PR น้อยที่สุด โดยที่ค่าน้ำสเซลสนัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น เมื่อค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สามารถสังเกตการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อกลมกับผนังของท่อกลมได้จากรูปร่างอุณหภูมิสำหรับกรณีของ CRT กรณีที่มีค่า DR = 0.5 และค่า PR = 4 (Temperature contour) ดังแสดงในรูปที่ 5.16 ถึง 5.21



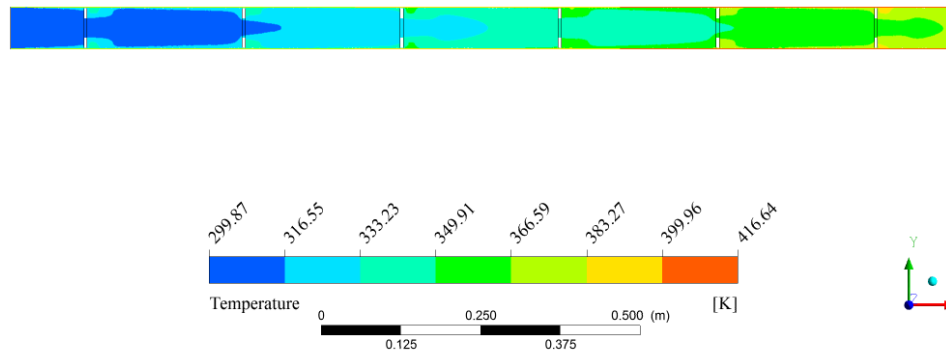
รูปที่ 5.16 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 4,000

ANSYS
R15.0

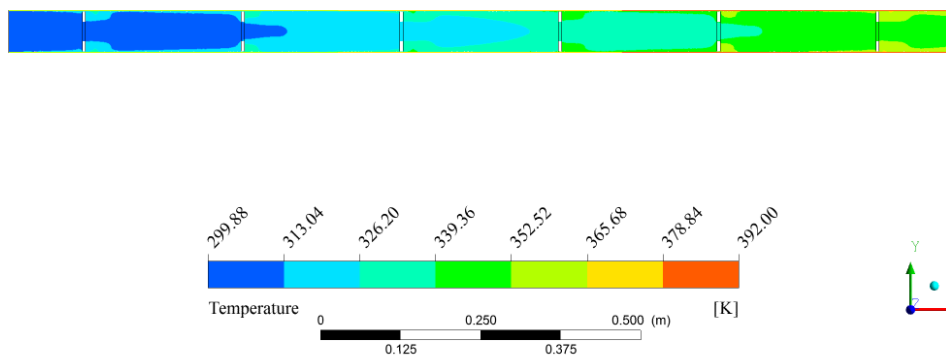
รูปที่ 5.17 ภาพขยายรูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 4,000$

ANSYS
R15.0

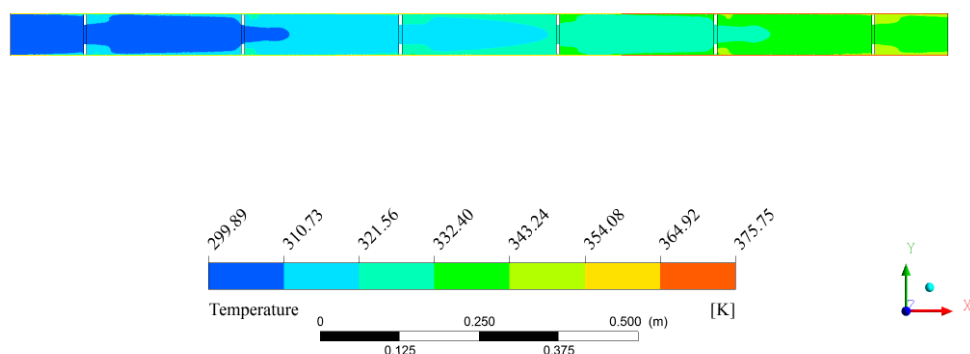
รูปที่ 5.18 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 8,000$

ANSYS
R15.0

รูปที่ 5.19 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วังแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 12,000

ANSYS
R15.0

รูปที่ 5.20 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วังแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 16,000



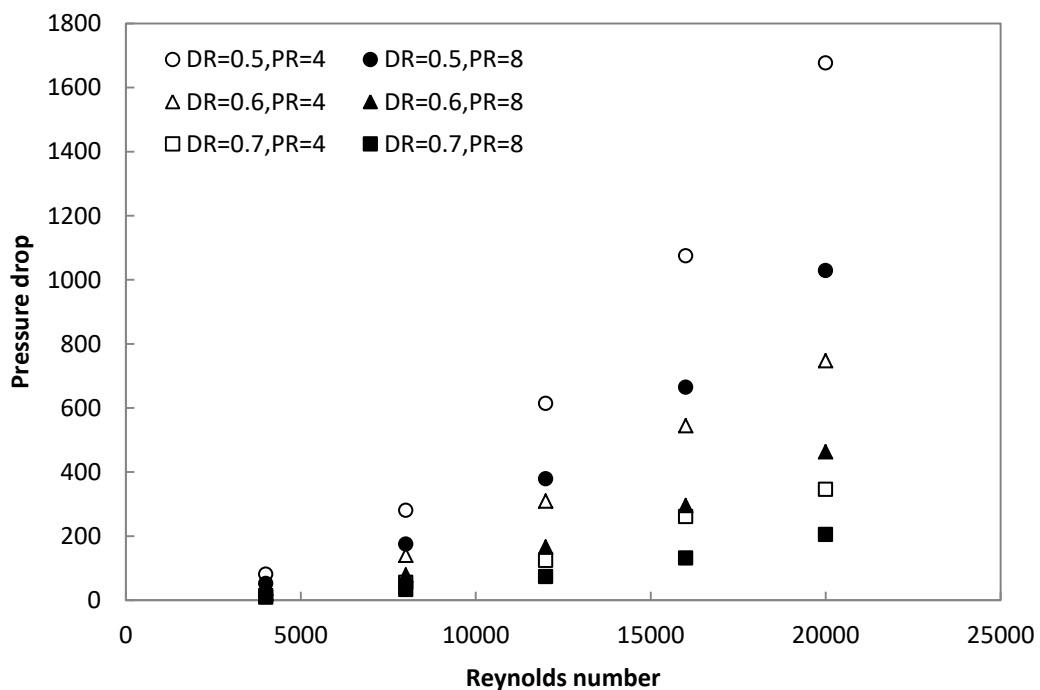
รูปที่ 5.21 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิสเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR = 4 ที่ค่า Re = 20,000

รูปที่ 5.16 ถึง 5.21 แสดงรูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิสเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณีที่ค่า DR = 0.5 และค่า PR = 4 ที่ค่า Re ตั้งแต่ 4,000 ถึง 20,000 พบว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สุทธระหว่างของไหลภายในท่อกลมกับผนังภายนอกสำหรับกรณีที่ค่า DR = 0.5 และค่า PR = 4 ที่ค่า Re = 20,000 โดยอุณหภูมินิ่งภายนอกลดลงเหลือเพียง 375.75 K เมื่อเปรียบเทียบกับค่า Re = 4,000 พบว่ามีความแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ค้อยติ๊ก โดยอุณหภูมินิ่งภายนอกสูงที่สุดเท่ากับ 576.77 K โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ผนังท่อกลมและของไหลภายในท่อกลมจะมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย และจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีเซลสนัมเบอร์ ดังแสดงรายละเอียดใน 4.2.1

เมื่อสังเกตภาพขยายรูปร่างอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 5.17 พบว่าที่บริเวณผนังส่วนปลายของของท่อกลมมีการแบ่งอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นเพราะผนังภายนอกของท่อกลมได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิของของไหลภายในท่อกลมค่อนข้างน้อย จึงทำให้บริเวณดังกล่าวปรากฏแถบสีแดงได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ มีอุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณผนังส่วนปลายของของท่อกลม

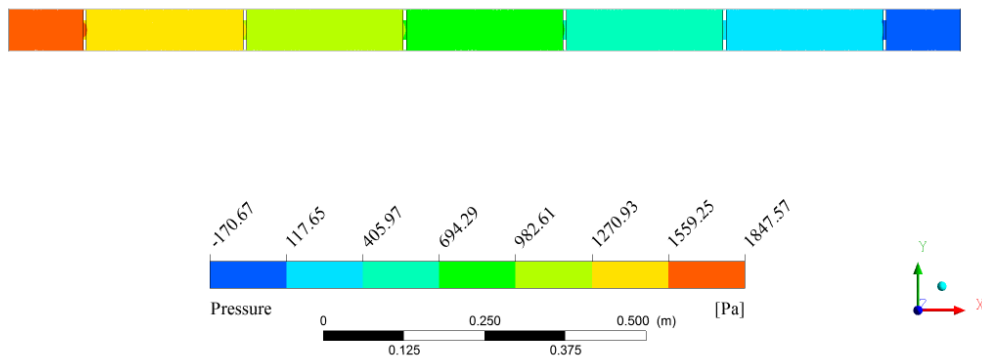
5.4 ความดันตกคร่อมภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์

สำหรับการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ภายในท่อกลมสิ่งหนึ่งที่เราควรคำนึงถึงคือ การเปลี่ยนแปลงความดัน หรือความดันตกคร่อมภายในท่อกลม สามารถตรวจสอบได้จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกคร่อมกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และรูปร่างความดัน (Pressure contour) ดังนี้

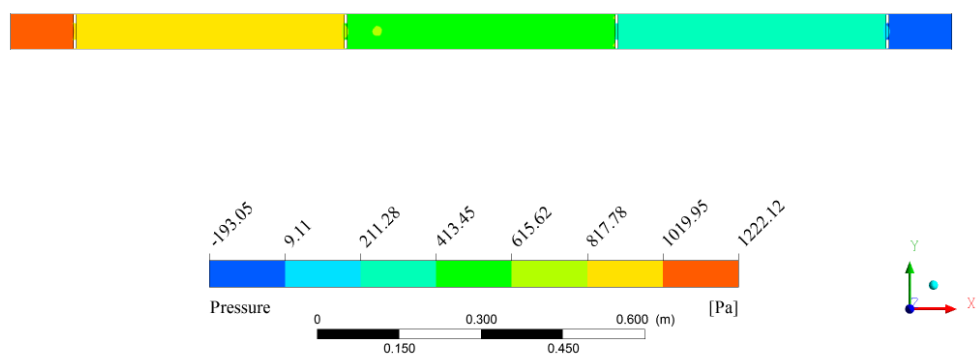


รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกคร่อมกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT

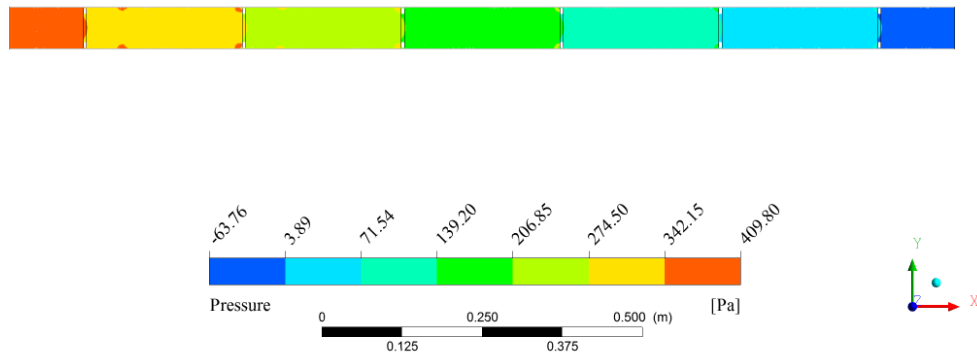
รูปที่ 5.22 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกคร่อมกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า DR = 0.5, 0.6 และ 0.7 และค่า PR = 4 และ 8 ผลจากการคำนวณสรุปว่าการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมที่มีค่า DR และค่า PR มากที่สุด (DR = 0.7 และ PR = 8) จะได้ค่าความดันตกคร่อม หรือการเปลี่ยนแปลงความดันภายในท่อกลมน้อยที่สุด สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความดันภายในท่อกลมจากการเปรียบเทียบรูปร่างความดันกรณีที่มีค่า DR = 0.5, PR = 4 และ 8 และกรณีที่มีค่า DR = 0.7 และค่า PR = 4 และ 8 ที่ค่า Re = 20,000

ANSYS
R15.0

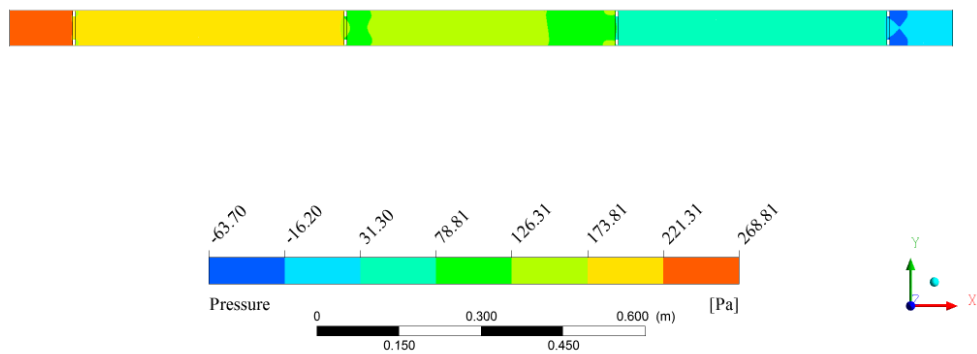
รูปที่ 5.23 รูปร่างความดันของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000

ANSYS
R15.0

รูปที่ 5.24 รูปร่างความดันของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) วงกลมกรณี DR = 0.5, PR= 8 ที่ค่า Re = 20,000

ANSYS
R15.0

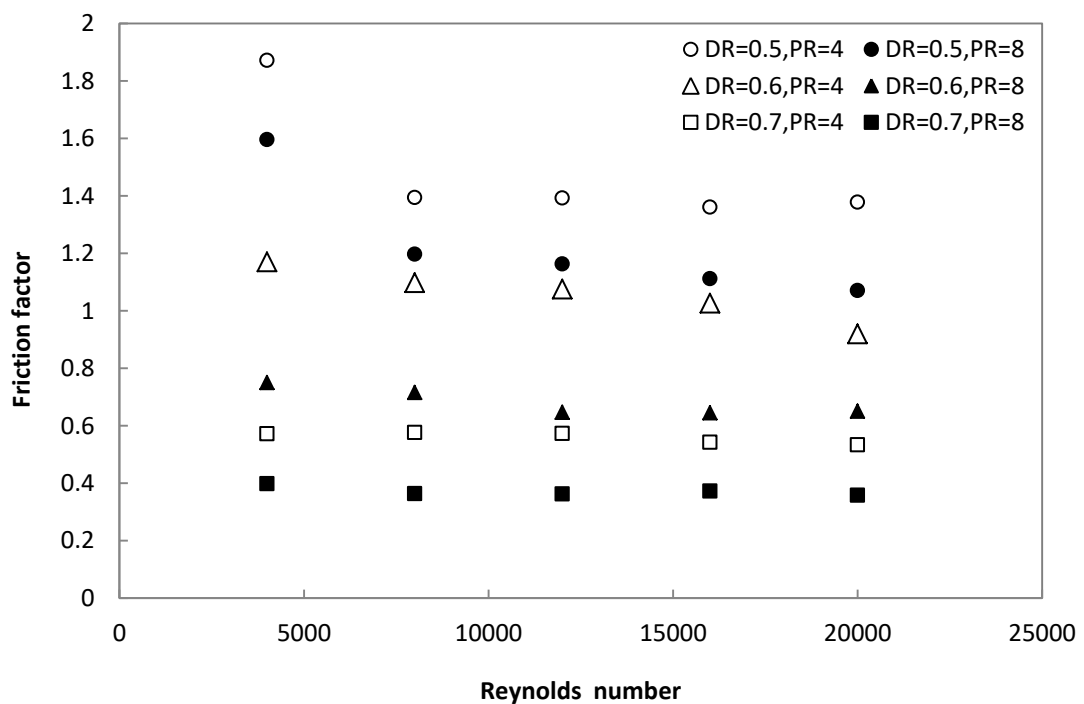
รูปที่ 5.25 รูปร่างความดันของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT)
วงกลมกรณี DR = 0.7, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000

ANSYS
R15.0

รูปที่ 5.26 รูปร่างความดันของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT)
วงกลมกรณี DR = 0.7, PR= 8 ที่ค่า Re = 20,000

รูปที่ 5.23 ถึง 5.26 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างความดันของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) ระหว่างกรณีที่มีค่า DR = 0.5 และค่า PR= 4 และ 8 และกรณีที่มีค่า DR = 0.7 และค่า PR= 4 และ 8 ที่ค่า Re = 20,000 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความดันหรือค่าความดันตกคร่อมภายในท่อกลมน้อยที่สุด คือ กรณีที่มีค่า DR = 0.7 และค่า PR = 8 เท่ากับ 268.81 Pa และพบว่าค่าความดันตกคร่อมมากที่สุดพบในกรณีที่มีค่า DR = 0.5 และค่า PR = 4 เท่ากับ 1,847.57 Pa

จะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองกรณีดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ และสำหรับปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้ค่าความดันตกคร่อมลดน้อยลงเป็นผลมาจากผลกระทบของค่า DR เป็นหลักซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน รวมไปถึงค่า PR ก็มีส่วนช่วยให้ค่าความดันตกคร่อมลดน้อยลงเช่นกัน



รูปที่ 5.27 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT

รูปที่ 5.27 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า $DR = 0.5, 0.6$ และ 0.7 และค่า $PR = 4$ และ 8 สำหรับผลการคำนวณสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะสอดคล้องกับค่าความดันตกคร่อม แสดงดังสมการ (4.5) (รายละเอียดอยู่ในบทที่ 4) โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ดีที่สุดพบได้ในกรณีที่มีค่า $DR = 0.7$ และค่า $PR = 8$ เช่นเดียวกับการคำนวณค่าความดันตกคร่อม

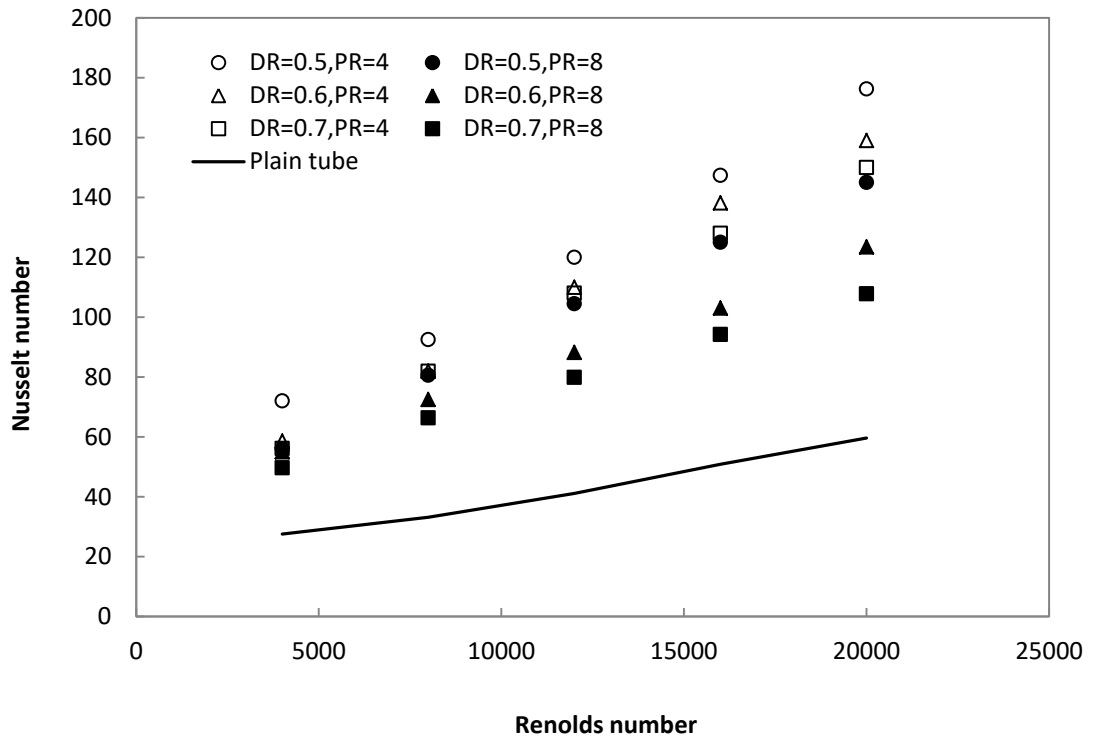
อย่างไรก็ตามการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบวงแหวนวงกลมสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นมาก แต่ก็ยังมีข้อเสียคือ ค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อกลมมีค่าสูงขึ้นค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีหลักการ Passive technique สำหรับการปรับปรุงลักษณะรูปร่างของเทอร์บิวเลเตอร์ เช่น การทำให้วงแหวนวงกลมเปลี่ยนลักษณะเป็นวงแหวนกรวย [5, 8] (หลักการเพิ่มค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน) และการเจาะรู [5, 7] ในที่นี้เป็นการตัดบางส่วนออก (Cut-out) ที่บริเวณพื้นผิวของเส้นรอบวงของเทอร์บิวเลเตอร์ (หลักการลดค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน) เป็นต้น

5.5 การเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนโดยการปรับปรุงรูปร่างของเทอร์บิวเลเตอร์

ในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเทอร์บิวเลเตอร์โดยการปรับปรุงรูปร่างของเทอร์บิวเลเตอร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม โดยพิจารณาในแง่ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน และค่าความดันตกคร่อมภายในท่อกลมไปพร้อมกัน สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการปรับปรุงรูปร่างลักษณะของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมออกเป็น 2 ประเภท (รายละเอียดของเทอร์บิวเลเตอร์ ประเภทต่างๆ อยู่ในบทที่ 1) คือ

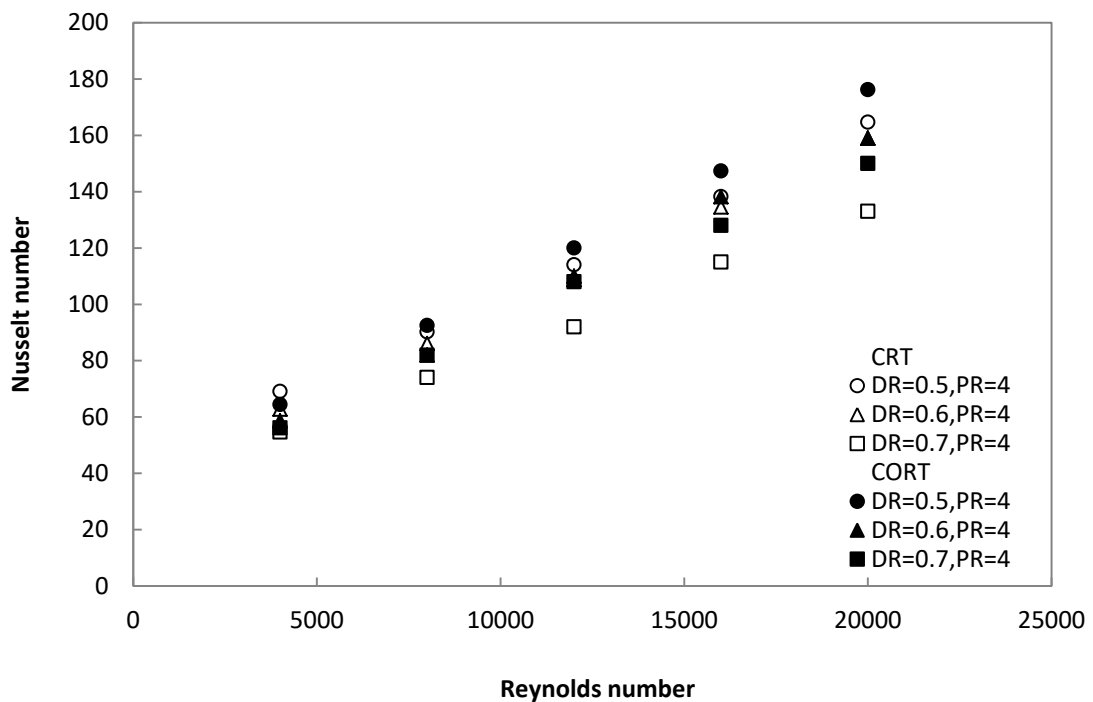
- 1) เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย Conical-ring turbulators (CORT)
- 2) เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง Gear-ring turbulators (GRT)

5.5.1 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย Conical-ring turbulators (CORT)



รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสแนมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CORT กับท่อกลมผิวเรียบ

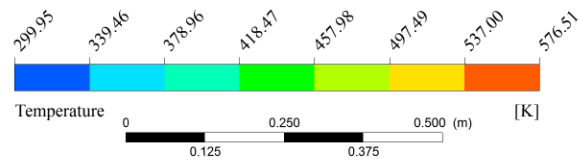
รูปที่ 5.28 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสแนมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยกับท่อกลมผิวเรียบ ผลจากการคำนวณสรุปว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนที่มีค่าดีที่สุด คือ กรณีที่ค่า $DR = 0.5$ และค่า $PR = 4$ ซึ่งพบว่าค่าตัวเลขสแนมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นถึง 87% ถึง 199% เมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ



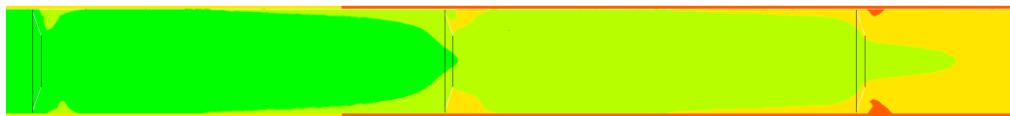
รูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสัณฐานเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT กับ CORT

รูปที่ 5.29 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสัณฐานเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ โดยทำการเปรียบเทียบท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กับเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) ในกรณีที่ค่า DR = 0.5, 0.6 และ 0.7 และค่า PR = 4 ผลจากเปรียบเทียบสรุปว่า ค่าตัวเลขสัณฐานเบอร์เฉลี่ยกรณีของ CORT เพิ่มขึ้น 3% ถึง 8% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของ CRT

สามารถสังเกตการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อกลมกับผนังของท่อกลมได้จากรูปร่างอุณหภูมิ (Temperature contour) สำหรับกรณีของ CORT กรณีที่ค่า DR = 0.5 และค่า PR = 4 ดังแสดงในรูปที่ 5.30 ถึง 5.35

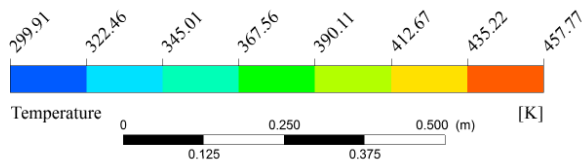
ANSYS
R15.0

รูปที่ 5.30 รูปปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT)
กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 4,000$

ANSYS
R15.0

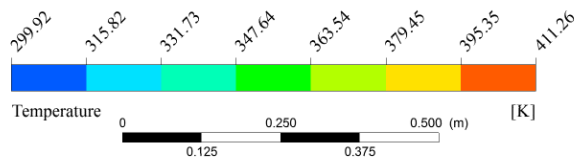
รูปที่ 5.31 ภาพขยายรูปปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวน
กรวย (CORT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 4,000$

ANSYS
R15.0

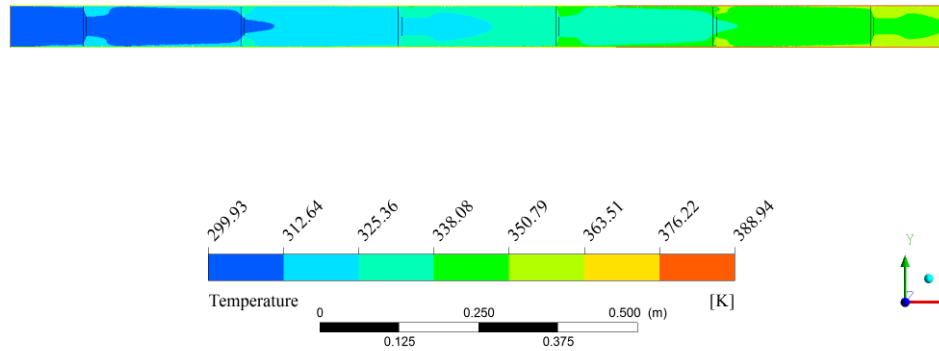


รูปที่ 5.32 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 8,000

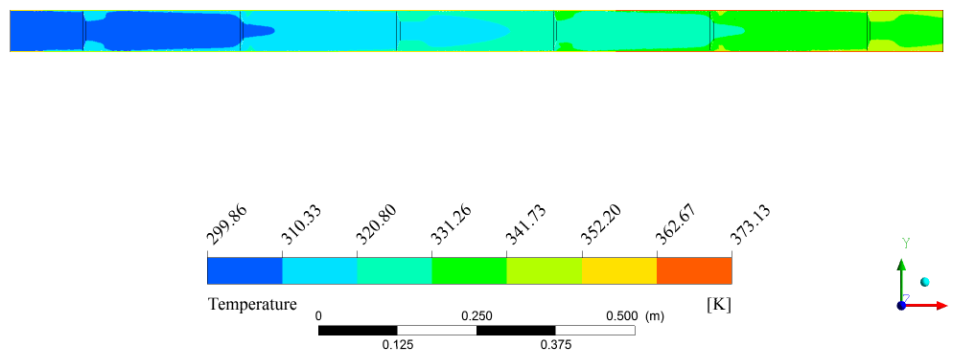
ANSYS
R15.0



รูปที่ 5.33 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 12,000

ANSYS
R15.0

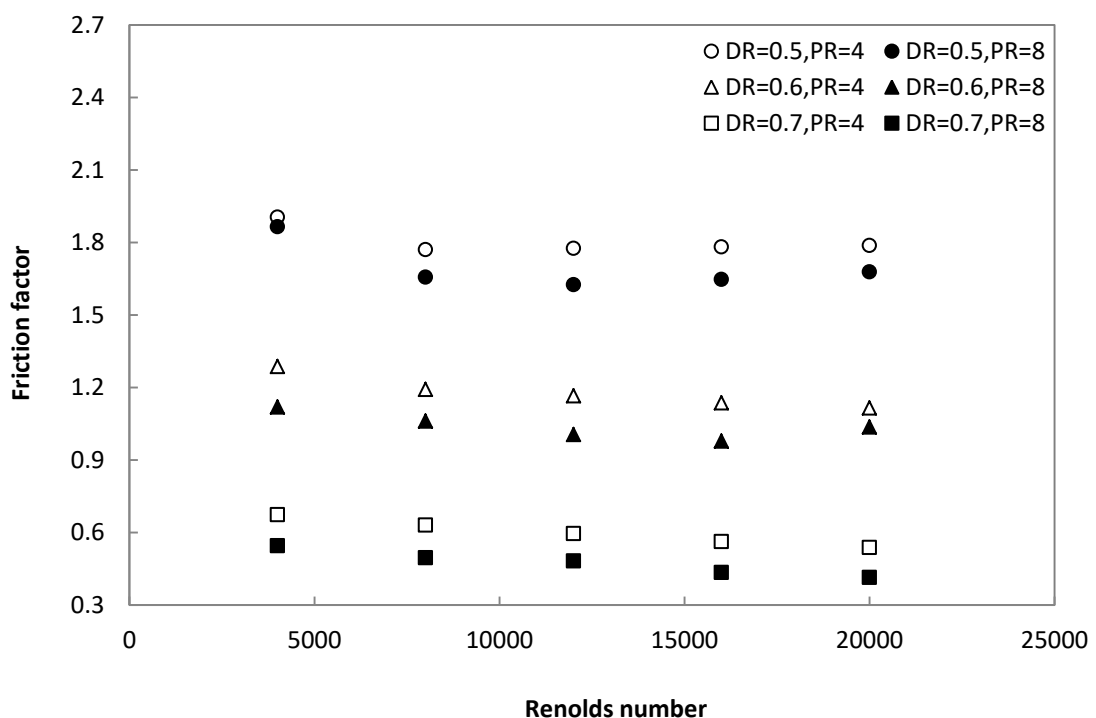
รูปที่ 5.34 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT)
กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 16,000

ANSYS
R15.0

รูปที่ 5.35 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT)
กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000

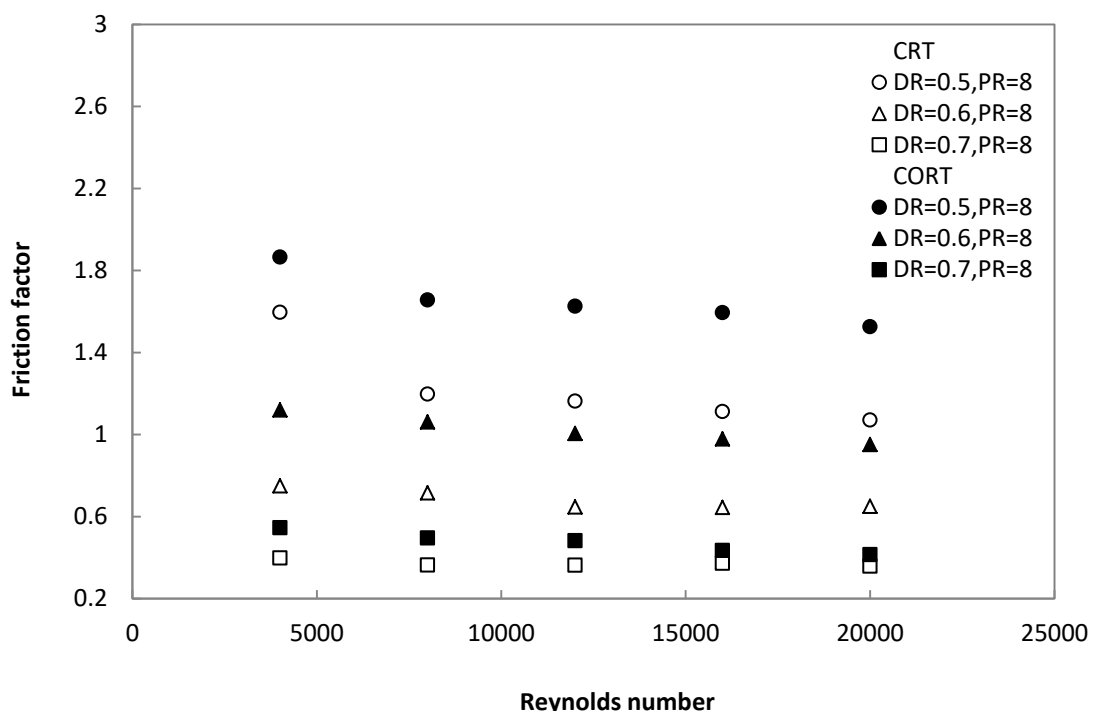
รูปที่ 5.30 ถึง 5.35 แสดงรูปร่างอุณหภูมิจากอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิสเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณีที่ค่า DR = 0.5 และค่า PR = 4 ที่ค่า Re ตั้งแต่ 4,000 ถึง 20,000 พบว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สุทธระหว่างของไหลภายในท่อกลมกับผนังภายนอกสำหรับกรณีที่ค่า DR = 0.5 และค่า PR = 4 ที่ค่า Re = 20,000 โดยอุณหภูมิมผนังภายนอกลดลงเหลือเพียง 373.13 K เมื่อเปรียบเทียบกับที่ค่า Re = 4,000 พบว่ามีความแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ค่อยดีนัก โดยอุณหภูมิมผนังภายนอกสูงที่สุดเท่ากับ 576.51 K โดยผลลัพธ์ที่ได้จะสอดคล้องกับกรณีของ CRT

เมื่อสังเกตภาพขยายรูปร่างอุณหภูมิต่างรูปที่ 5.31 พบว่าที่บริเวณผนังส่วนปลายของของท่อกลมมีการแบ่งอุณหภูมิต่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นเพราะผนังภายนอกของท่อกลมได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิจากของไหลภายในท่อกลมค่อนข้างน้อย จึงทำให้บริเวณดังกล่าวปรากฏแถบสีแดงได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ มีอุณหภูมิต่างที่บริเวณผนังส่วนปลายของของท่อกลม เช่นเดียวกับกรณีของ CRT



รูปที่ 5.36 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CORT

รูปที่ 5.36 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) ผลจากการคำนวณสรุปว่า ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยกรณีที่มีค่า $DR = 0.5$ และค่า $PR = 4$ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงที่สุดเช่นเดียวกับกรณีของ CRT ซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้ล่วงหน้า



รูปที่ 5.37 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT กับ CORT

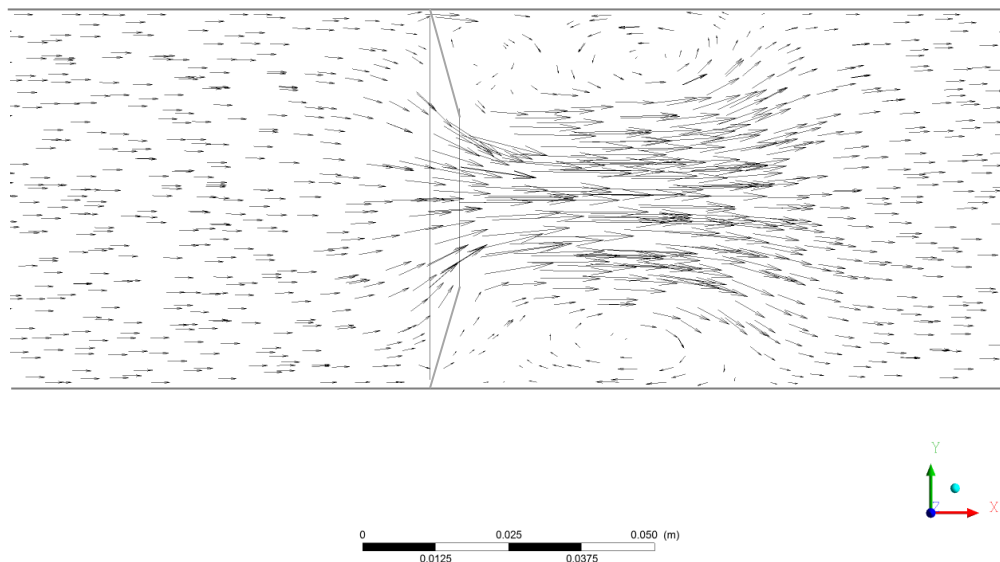
รูปที่ 5.37 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์โดยเปรียบเทียบท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) กับเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) ในกรณีที่มีค่า $DR = 0.5, 0.6$ และ 0.7 และค่า $PR = 8$ ผลจากการคำนวณสรุปว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มีค่าสูงที่สุด คือ ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยกรณีที่มีค่า $DR = 0.5$ และค่า $PR = 4$ เช่นเดียวกับกรณีของ CRT และยังคงพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกรณีของ CORT เพิ่มขึ้น 2% ถึง 5% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของ CRT

จากผลการคำนวณที่ได้ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การปรับปรุงรูปร่างของ CRT ให้มีลักษณะที่เปลี่ยนไปเป็น CORT ทำให้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดคือ กรณีของ CORT

ANSYS
R15.0



รูปที่ 5.38 เวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000



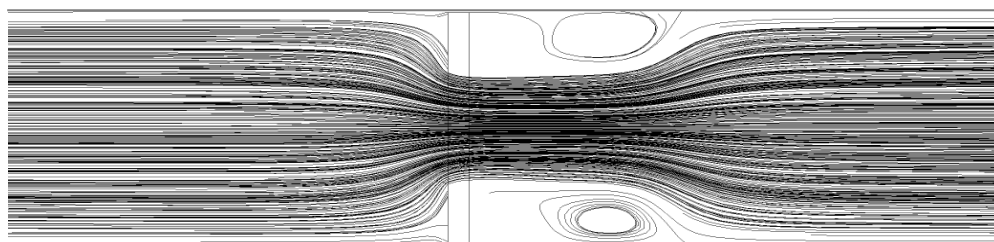
รูปที่ 5.39 ภาพขยายเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 20,000$

รูปที่ 5.38 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณีที่ค่า $DR = 0.5$ และค่า $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 20,000$ พบว่า ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเปลี่ยนรูปร่างของเทอร์บิวเลเตอร์จะส่งผลให้ความเร็วเพิ่มขึ้นที่บริเวณทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์กรวย ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่น่าพอใจอย่างมากในการปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน แต่สำหรับการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยนั้นจะเกิดช่วงบริเวณการไหลที่หมุนวนของของไหล (Recirculation region) ซึ่งแสดงภาพขยายเวกเตอร์ของอากาศดังรูปที่ 5.39

การเกิดบริเวณการไหลหมุนวน (Recirculation region) สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ไหลผ่านสิ่งกีดขวาง และเทอร์บิวเลเตอร์จะเกิดขึ้นบริเวณด้านหลังของสิ่งกีดขวาง หรือบริเวณด้านหลังของเทอร์บิวเลเตอร์ที่สัมผัสกับผนังของท่อกลม โดยบริเวณที่เกิดการไหลหมุนวนนั้นจะเกิดขึ้นจากการแยกตัวของการไหลที่ผ่านสิ่งกีดขวาง และเทอร์บิวเลเตอร์ โดยจะส่งผลให้ของไหลบริเวณนั้น

มีความดันลดต่ำลง เนื่องจากของไหลจะมีลักษณะการไหลที่หมุนวนบริเวณดังกล่าวตลอดช่วงการไหลภายในท่อกลม แสดงดังรูปที่ 5.40 และ 5.41

ANSYS
R15.0

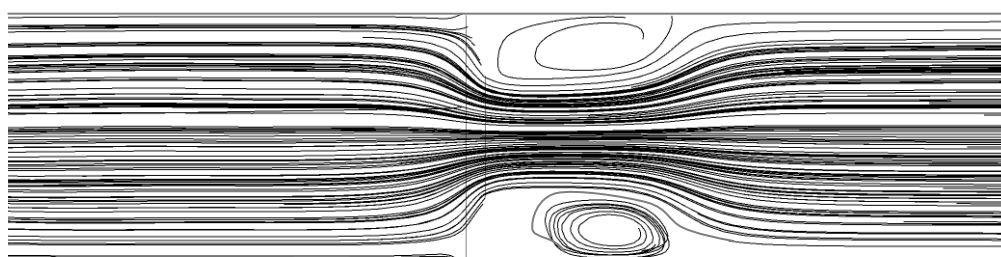


0 0.0175 0.035 0.053 0.070 (m)



รูปที่ 5.40 ภาพขยายเส้นกระแสการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกลม (CRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000

ANSYS
R15.0



0 0.02 0.04 0.060 0.080 (m)



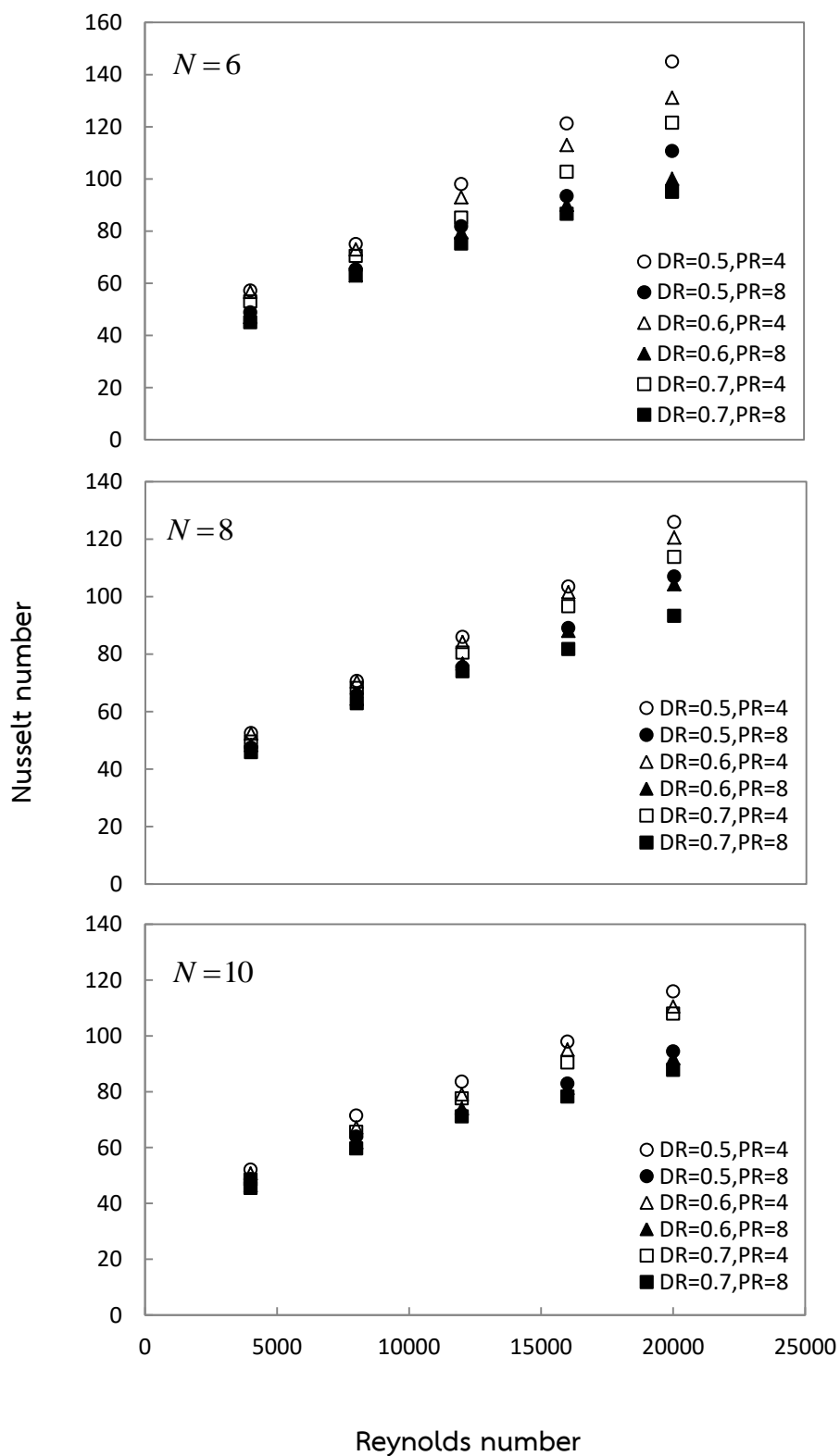
รูปที่ 5.41 ภาพขยายเส้นกระแสการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000

รูปที่ 5.40 และ 5.41 แสดงภาพขยายเส้นกระแสการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกลม (CRT) และเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT) กรณีที่ค่า $DR = 0.5$ และค่า $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 20,000$ เมื่อสังเกตเส้นกระแสการไหลของอากาศบริเวณทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์ที่สัมผัสกับผนังท่อกลม พบว่า บริเวณดังกล่าวจะเกิดช่วงการไหลหมุนวน (Recirculation region) ทั้งนี้เป็นผลมาจากลักษณะการไหลที่ถูกกีดขวางโดยอุปกรณ์เทอร์บิวเลเตอร์ ดังนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันค่อนข้างมากที่บริเวณนั้น จึงส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นจากการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ทั้งสองรูปแบบ

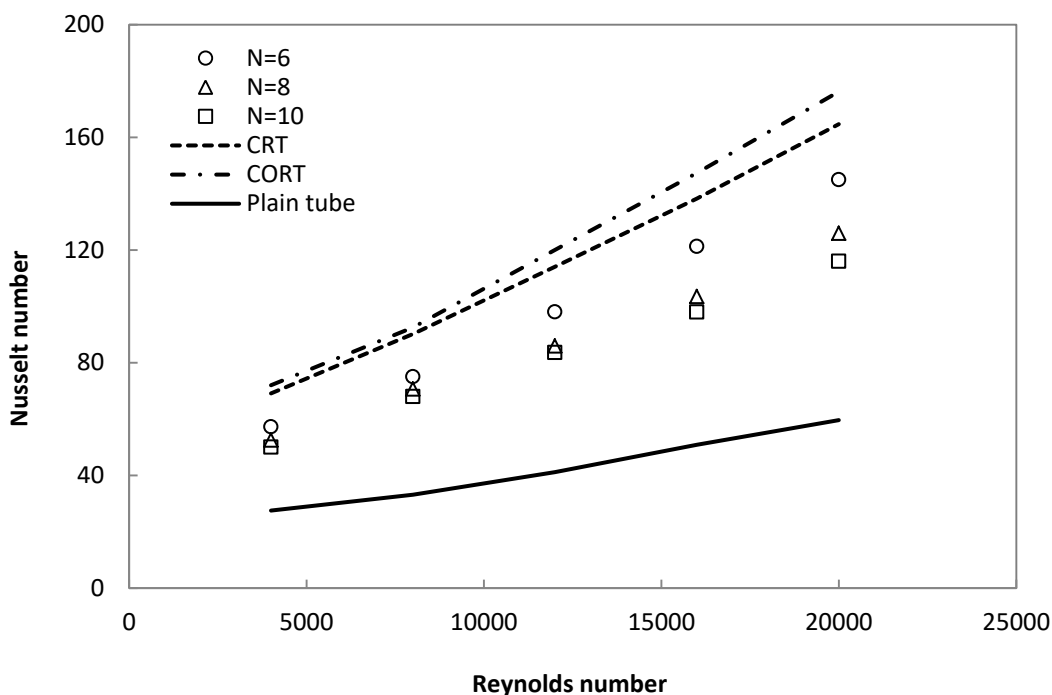
จะเห็นได้ว่า จากการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ทั้งสองรูปแบบจะส่งผลให้ค่านัสเซลสไนม์เบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่น่าพอใจสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน แต่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกลับมีค่าที่เพิ่มขึ้นจากเดิมดังที่คาดไว้ จึงได้ทำการปรับปรุงให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อกลมลดน้อยลง คือ วิธีการตัดบางส่วนออก (Cut-out) ตรงบริเวณพื้นผิวรอบเส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมภายในท่อกลม บริเวณที่สัมผัสกับเทอร์บิวเลเตอร์ ให้มีลักษณะรูปร่างที่เปลี่ยนไปเป็นเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียง

5.5.2 เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียง Gear-ring turbulator (GRT)

รูปที่ 5.42 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณค่านัสเซลสไนม์เบอร์เฉลี่ยที่ค่าเรย์โนลด์สเบอร์ต่างๆ ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียงในกรณีต่างๆ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า DR ค่า PR และค่า N ผลจากการคำนวณสรุปว่า ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดของการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์เพียงโดยที่ $N = 6, 8$ และ 10 คือกรณีที่ค่า $DR = 0.5$ และค่า $PR = 4$ เช่นเดียวกับกรณีของ CRT และ CORT



รูปที่ 5.42 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT



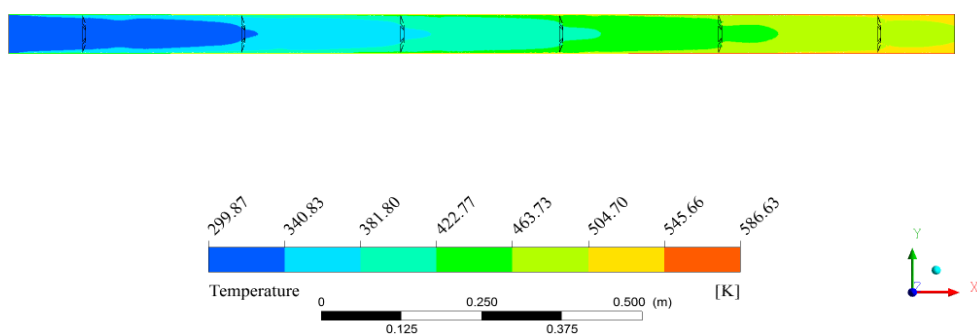
รูปที่ 5.43 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสแนมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ กับท่อผิวเรียบ

รูปที่ 5.43 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสแนมเบอร์เฉลี่ยกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ทั้งสามรูปแบบกรณีที่ค่า $DR = 0.5$ และค่า $PR = 4$ ผลการคำนวณสรุปว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนที่มีค่าสูงที่สุด คือ ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียงโดยที่ $N = 6$ พบว่า ค่าตัวเลขสแนมเบอร์เฉลี่ยที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบวงแหวนเพียงเพิ่มขึ้นถึง 73% ถึง 143% เมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ แต่มีค่าลดลง 15% ถึง 18% เมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม และเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย

จะเห็นได้ว่า ผลกระทบที่ได้จากการตัดบางส่วนของบริเวณพื้นผิวของเส้นรอบวงของเทอร์บิวเลเตอร์จึงทำให้ลดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน สังเกตได้จากรูปร่างอุณหภูมิจากรูปร่างของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน และเวกเตอร์ความเร็ว โดยอากาศสามารถไหลผ่านช่องที่ถูกตัดออก

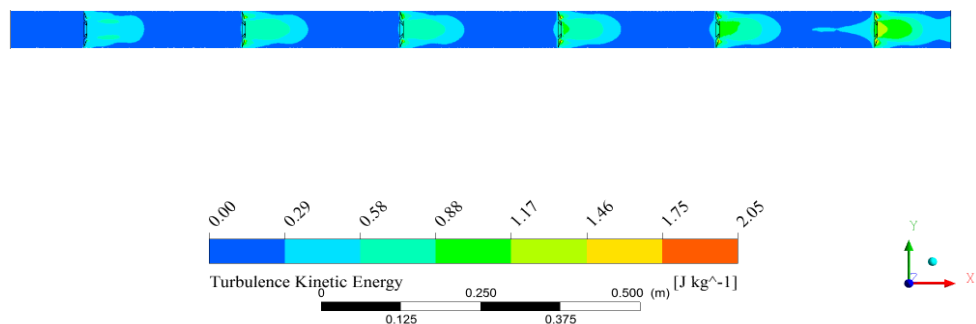
ซึ่งบริเวณดังกล่าวมีการเพิ่มระดับความแปรปรวนของการไหล และทำให้ผนังของท่อกลมได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิของของไหลภายในท่อกลมได้มาก (แสดงดังรูปที่ 5.44 ถึง 5.50)

ANSYS
R15.0

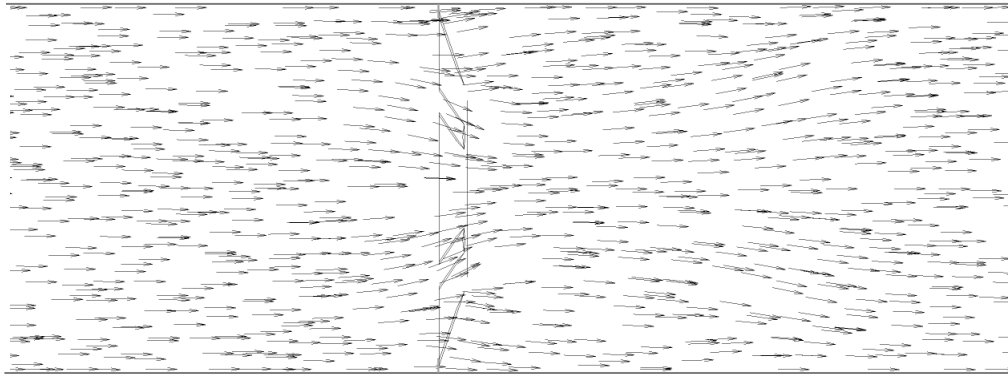


รูปที่ 5.44 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR = 4 และ $N = 6$ ที่ค่า $Re = 4,000$

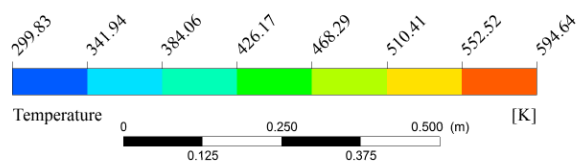
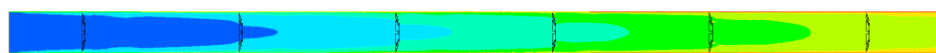
ANSYS
R15.0



รูปที่ 5.45 รูปร่างพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR = 4 และ $N = 6$ ที่ค่า $Re = 4,000$

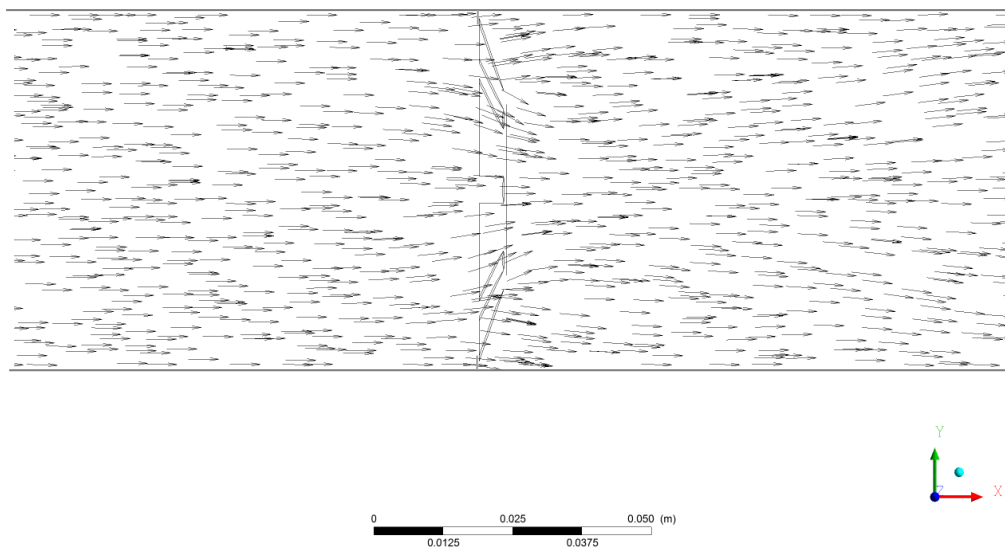
ANSYS
R15.0

รูปที่ 5.46 ภาพขยายเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพ็อง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 และ $N = 6$ ที่ค่า $Re = 4,000$

ANSYS
R15.0

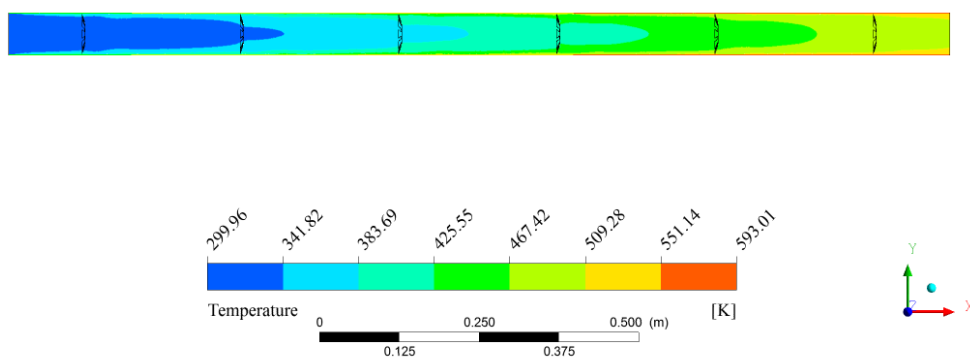
รูปที่ 5.47 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพ็อง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 และ $N = 8$ ที่ค่า $Re = 4,000$

ANSYS
R15.0

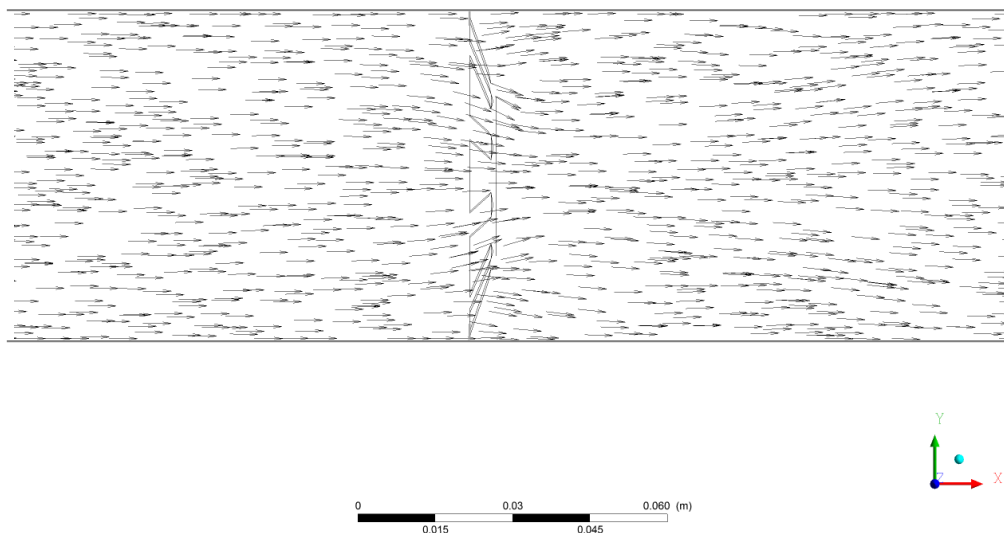


รูปที่ 5.48 ภาพขยายเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 และ N = 8 ที่ค่า Re = 4,000

ANSYS
R15.0

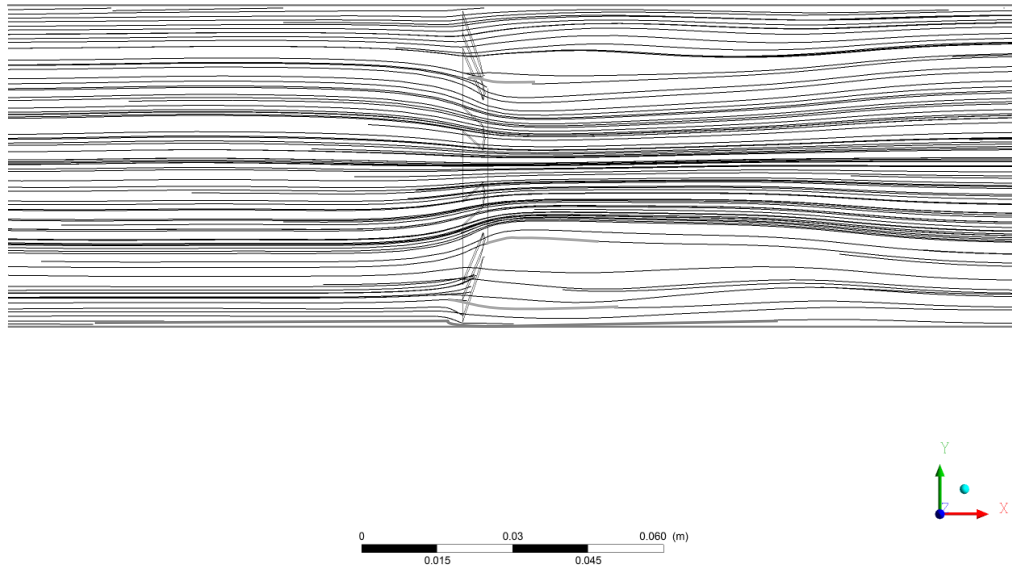


รูปที่ 5.49 รูปร่างอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 และ N = 10 ที่ค่า Re = 4,000



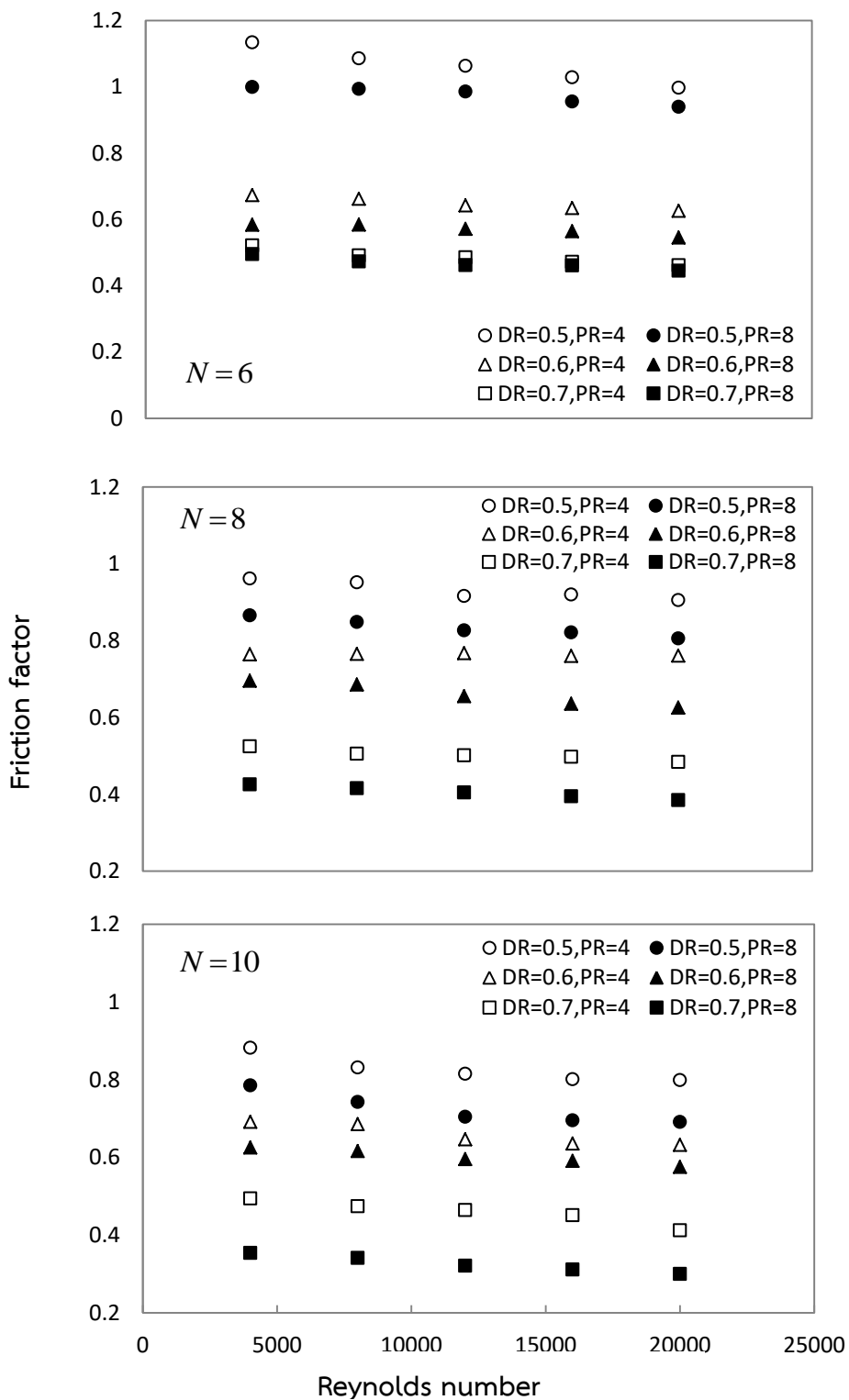
รูปที่ 5.50 ภาพขยายเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 และ $N = 10$ ที่ค่า $Re = 4,000$

รูปที่ 5.44 ถึง 5.50 แสดงรูปร่างอุณหภูมิจากการจำลองรูปร่างพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน และเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) กรณีที่ค่า $DR = 0.5$ และค่า $PR = 4$ โดยที่ $N = 6, 8$ และ 10 ที่ค่า $Re = 4,000$ ผลการคำนวณสรุปว่า สำหรับรูปร่างอุณหภูมิจากการจำลองของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟืองกรณี $N = 6$ มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี $N = 8$ และ 10 ทั้งนี้เป็นผลมาจากภายในท่อกลมมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมากที่สุด และมีการเพิ่มระดับความแปรปรวนบริเวณช่องที่ถูกตัดออกใกล้กับผนังท่อกลม (แสดงดังรูปที่ 5.45) ทำให้ผนังของท่อกลมสามารถรับอิทธิพลจากอุณหภูมิจากของไหลภายในท่อกลมได้ และสำหรับเวกเตอร์ความเร็วของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟืองทั้งสามกรณี มีความเร็วสูงสุดบริเวณทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์และบริเวณช่องที่ถูกตัดออก สามารถสรุปได้ว่าจำนวนช่องที่ถูกตัดออกเพิ่มขึ้น ความเร็วของของไหลสามารถกระจายตัวไปยังช่องว่างโดยที่ของไหลสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้

ANSYS
R15.0

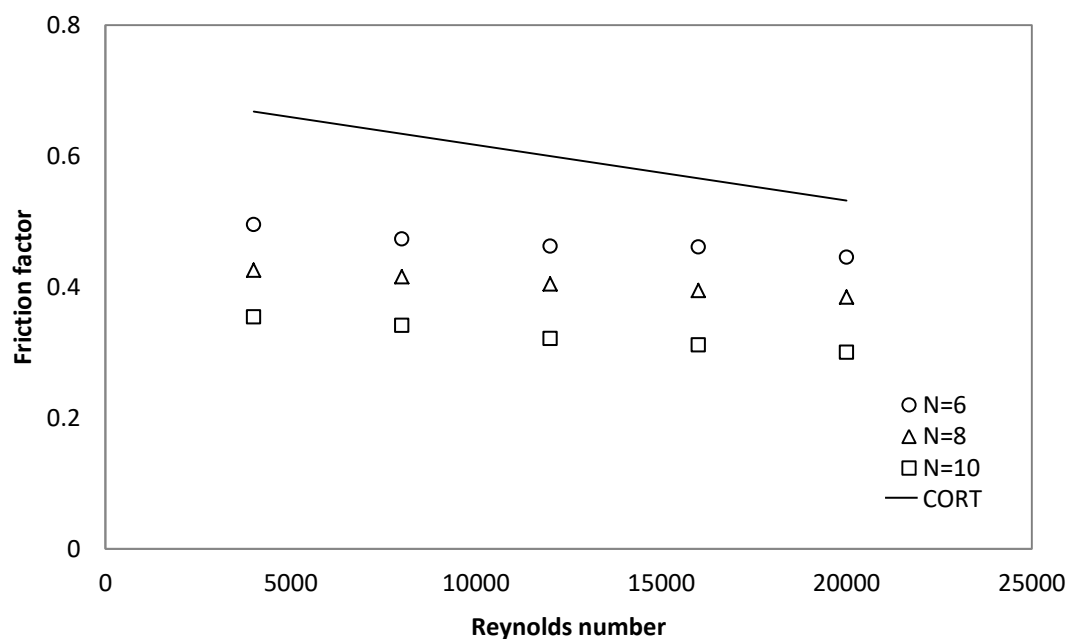
รูปที่ 5.51 ภาพขยายเส้นกระแสการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพื่อง (GRT) กรณี $DR = 0.5$, $PR = 4$ และ $N = 10$ ที่ค่า $Re = 4,000$

รูปที่ 5.51 แสดงภาพขยายเส้นกระแสการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพื่อง (GRT) กรณีที่ค่า $DR = 0.5$ และค่า $PR = 4$ โดยที่ $N = 10$ ที่ค่า $Re = 4,000$ โดยการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์เพื่องนั้นอากาศสามารถไหลผ่านบริเวณทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์ เช่นเดียวกับกรณีของ CRT และ CORT แต่ในกรณีของ GRT นั้นของไหลสามารถกระจายตัวและไหลผ่านบริเวณช่องที่ถูกตัดออกได้ ทำให้มีการเพิ่มระดับความแปรปรวนบริเวณดังกล่าว



รูปที่ 5.52 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT

รูปที่ 5.52 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า DR ค่า PR และค่า N ผลจากการคำนวณสรุปว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ดีที่สุดของการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์เฟืองโดยที่ $N = 6, 8$ และ 10 คือ กรณีที่ค่า $DR = 0.7$ และค่า $PR = 8$ เช่นเดียวกับกรณีของ CRT และ CORT



รูปที่ 5.53 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT กับ CORT

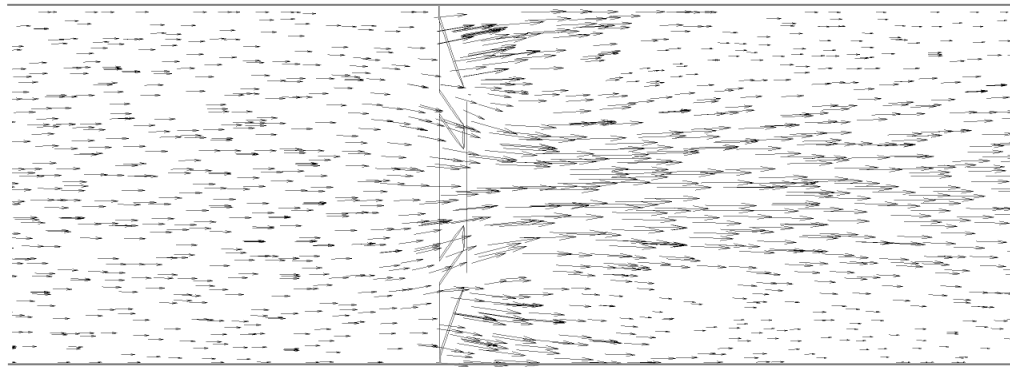
รูปที่ 5.53 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง (GRT) ในกรณีที่ค่า $DR = 0.7$ และค่า $PR = 8$ สำหรับจำนวนช่องที่ถูกตัดออกโดยที่ $N = 6, 8$ และ 10 ผลการคำนวณสรุปว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มีค่าดีที่สุดคือ ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟืองกรณีโดยที่ $N = 10$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบวงแหวนเฟืองลดลง 28% ถึง 74% เมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกรวย

จากผลการคำนวณสำหรับการลดลงของค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดภายในท่อกลม ทำให้ทราบว่า การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์นั้นจะช่วยเพิ่มค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นมาก แต่ในขณะเดียวกันจะส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นด้วยตามที่คาดไว้ ซึ่งการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียงนั้นสามารถช่วยลดค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดภายในท่อกลมได้บางส่วน โดยยังคงค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงอยู่

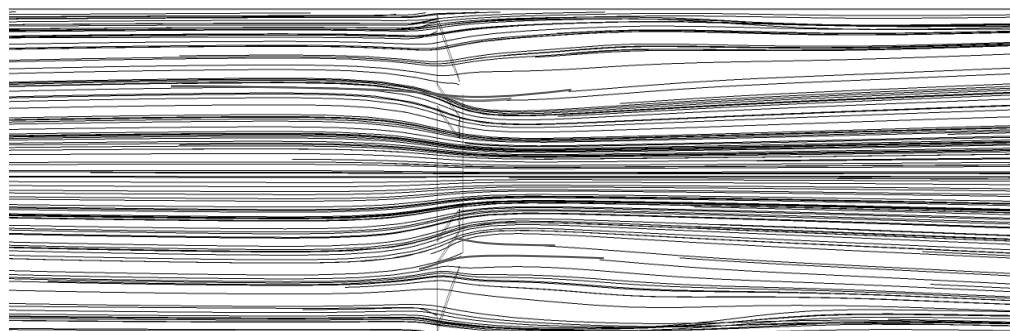
ANSYS
R15.0



รูปที่ 5.54 แสดงรูปร่างความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000 และ N = 6

ANSYS
R15.0

รูปที่ 5.55 ภาพขยายเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวน
เฟือง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000 และ N = 6

ANSYS
R15.0

รูปที่ 5.56 ภาพขยายเส้นกระแสการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวน
เฟือง (GRT) กรณี DR = 0.5, PR= 4 ที่ค่า Re = 20,000 และ N = 6

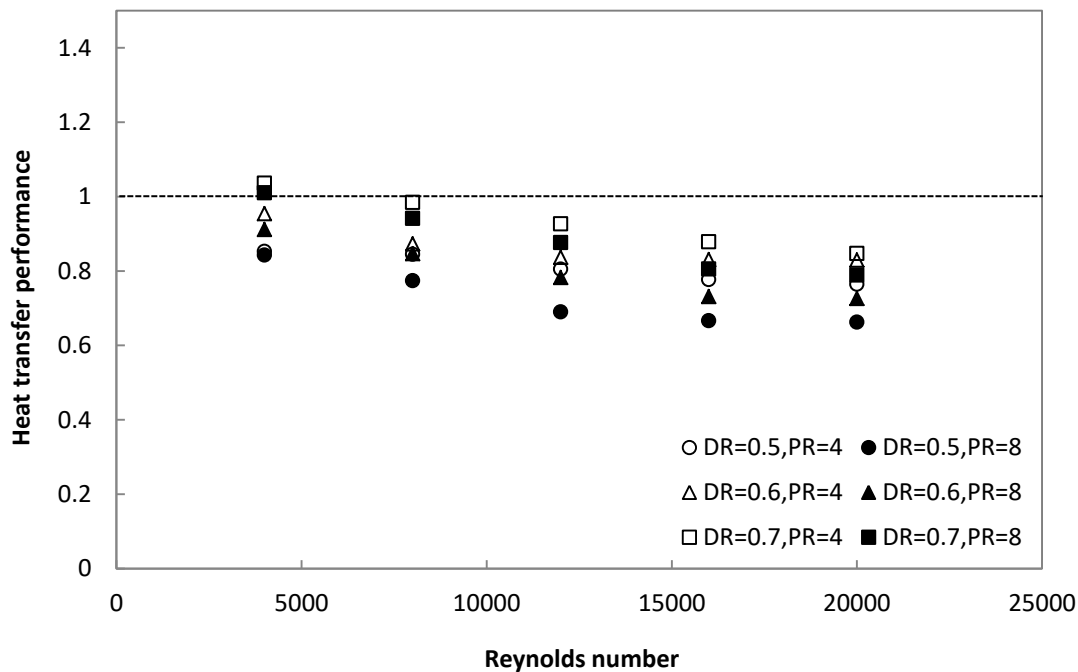
รูปที่ 5.54 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียง (GRT) กรณีที่ค่า $DR = 0.5$, $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 20,000$ และโดยที่ $N = 6$ จะสังเกตเห็นว่า เวกเตอร์ความเร็วสามารถไหลผ่านบริเวณทางออกของเทอร์บิวเลเตอร์และบริเวณช่องที่ถูกตัดออกและสำหรับรูปที่ 5.55 และ 5.56 แสดงภาพขยายเวกเตอร์ และเส้นกระแสการไหลของความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียง พบว่าอากาศสามารถไหลผ่านบริเวณช่องที่ถูกตัดออกได้ สามารถลดการเกิดช่วงบริเวณการไหลหมุนวน (Recirculation region) จึงทำให้ลดการเปลี่ยนแปลงความดันลงได้ จึงส่งผลให้ช่วยลดค่าความดันตกคร่อม และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลงได้

จะเห็นได้ว่า เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียงเป็นนวัตกรรมที่ช่วยลดค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อกลม ซึ่งลักษณะรูปเฟืองที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการขึ้นรูปที่ไม่ยากนัก เช่นเมื่อเปรียบเทียบกับ การขึ้นรูปของเทอร์บิวเลเตอร์แบบแผ่นเกลียวบิด [11, 21] เป็นต้น สำหรับในแง่ของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนนั้น พบว่า เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียงมีค่าประสิทธิภาพที่ลดลงบ้างเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์บิวเลเตอร์วงกลมและวงแหวนกรวย แต่สำหรับค่าความดันตกคร่อมจะลดลงมากอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการเจาะรูของเทอร์บิวเลเตอร์ พบว่า การตัดบางส่วนออก (Cut-out) สำหรับเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียงนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการเจาะรูสำหรับการทดลองของ Kongkaitpaiboon et al. [5] (แสดงการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.7 และ 4.8)

5.6 ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์

การศึกษาค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์เป็นแพกเตอร์ที่บอกถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ และสามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรือความสามารถในการใช้งาน ซึ่งค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ได้นั้นต้องประกอบไปด้วยปัจจัยดังต่อไปนี้คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูง และในขณะเดียวกันต้องมีค่าความดันตกคร่อมที่ต่ำด้วย ซึ่งค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเป็นแพกเตอร์ระหว่างอัตราส่วนของค่าประสิทธิภาพกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ดังแสดงรายละเอียดใน 4.2.3

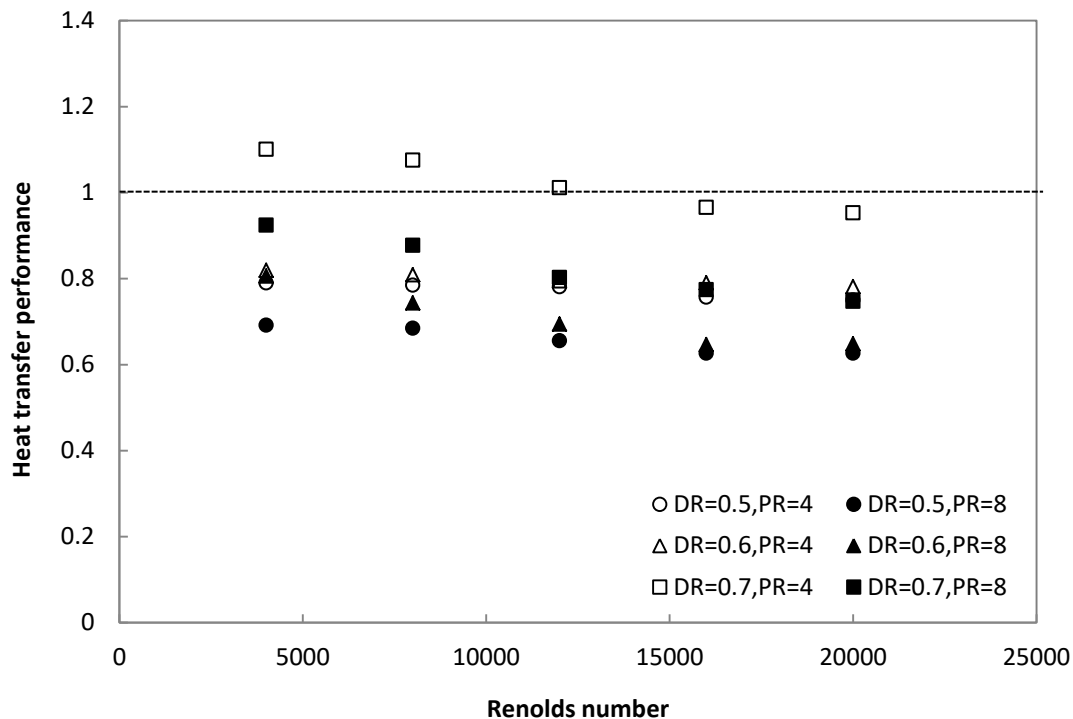
5.6.1 ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม



รูปที่ 5.57 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT

รูปที่ 5.57 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม โดยทำการเปลี่ยนแปลงกรณีที่มีค่า DR = 0.5, 0.6 และ 0.7 และค่า PR = 4 และ 8 ผลจากการคำนวณสรุปว่า การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมกรณีที่มีค่า DR = 0.7 และค่า PR = 4 มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด เป็นผลมาจากค่านัสเซลสแนมเซลสแนมเบอร์ที่ค่อนข้างสูง และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำที่สุด

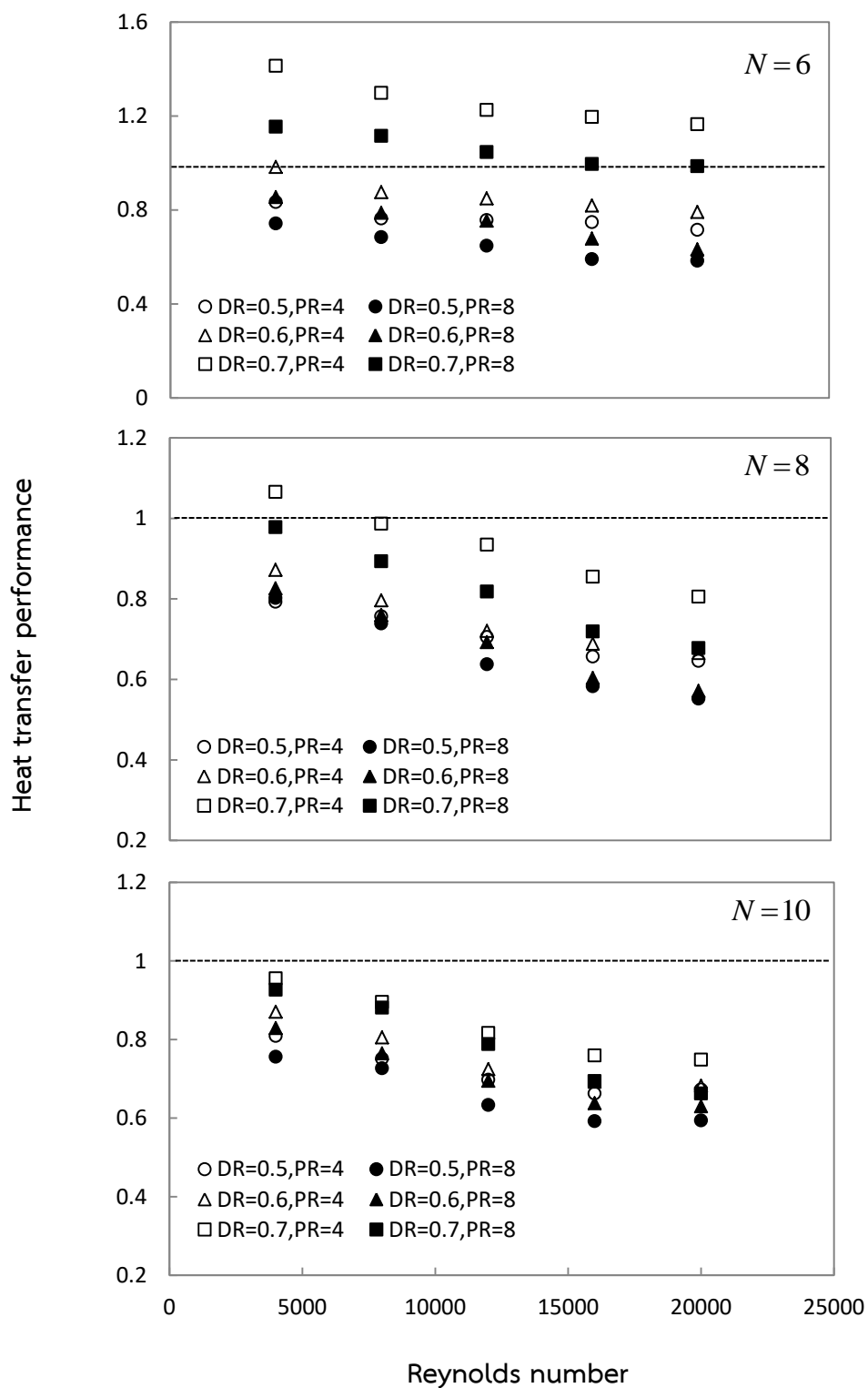
5.6.2 ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย



รูปที่ 5.58 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณี CORT

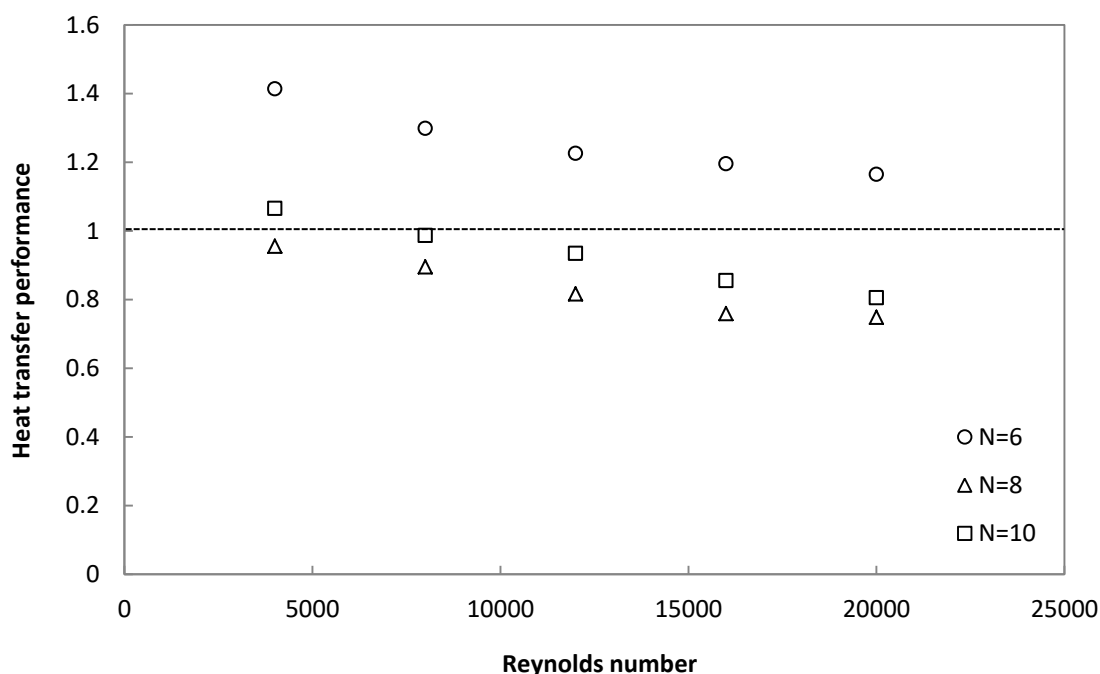
รูปที่ 5.58 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย โดยทำการเปลี่ยนแปลงกรณีที่มีค่า DR = 0.5, 0.6 และ 0.7 และค่า PR = 4 และ 8 ผลจากการคำนวณสรุปว่า การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยกรณีที่มีค่า DR = 0.7 และค่า PR = 4 มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดเช่นเดียวกับกรณีของ CRT

5.6.3 ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียง



รูปที่ 5.59 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT

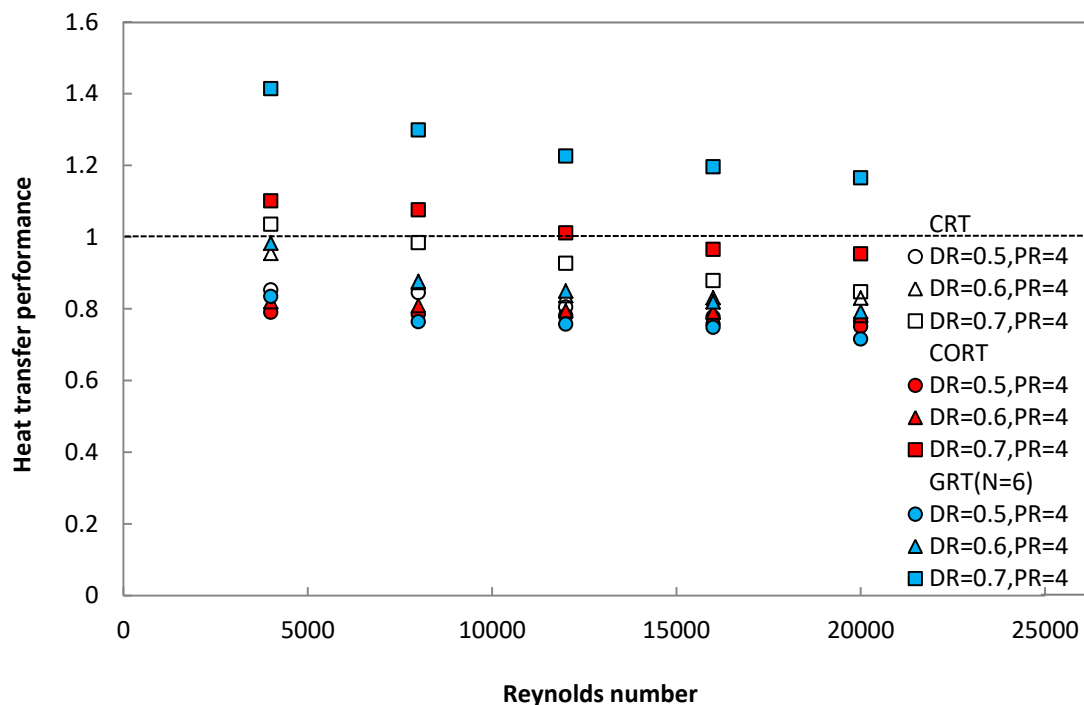
รูปที่ 5.59 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียง (GRT) ในกรณีต่างๆ โดยทำการเปลี่ยนแปลงกรณีที่มีค่า DR = 0.5, 0.6 และ 0.7 และค่า PR = 4 และ 8 และผลกระทบที่ได้จากจำนวนช่องที่ถูกตัดออก (N) ผลจากการคำนวณสรุปว่า ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดของการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์เพียงโดยที่ $N = 6, 8$ และ 10 คือ การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียงกรณีที่มีค่า DR = 0.7 และค่า PR = 4 เช่นเดียวกับกรณีของ CRT และ CORT



รูปที่ 5.60 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT กรณีที่มีค่า DR = 0.7 และ PR = 4

รูปที่ 5.60 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียง (GRT) ในกรณีที่มีค่า DR = 0.7 และ PR = 4 สำหรับจำนวนช่องที่ถูกตัดออกโดยที่ $N = 6, 8$ และ 10 ผลการคำนวณสรุปว่า กรณีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์เพียงกรณีจำนวนช่องที่ถูกตัดออกโดยที่ $N = 6$ ให้ค่าสมรรถนะ

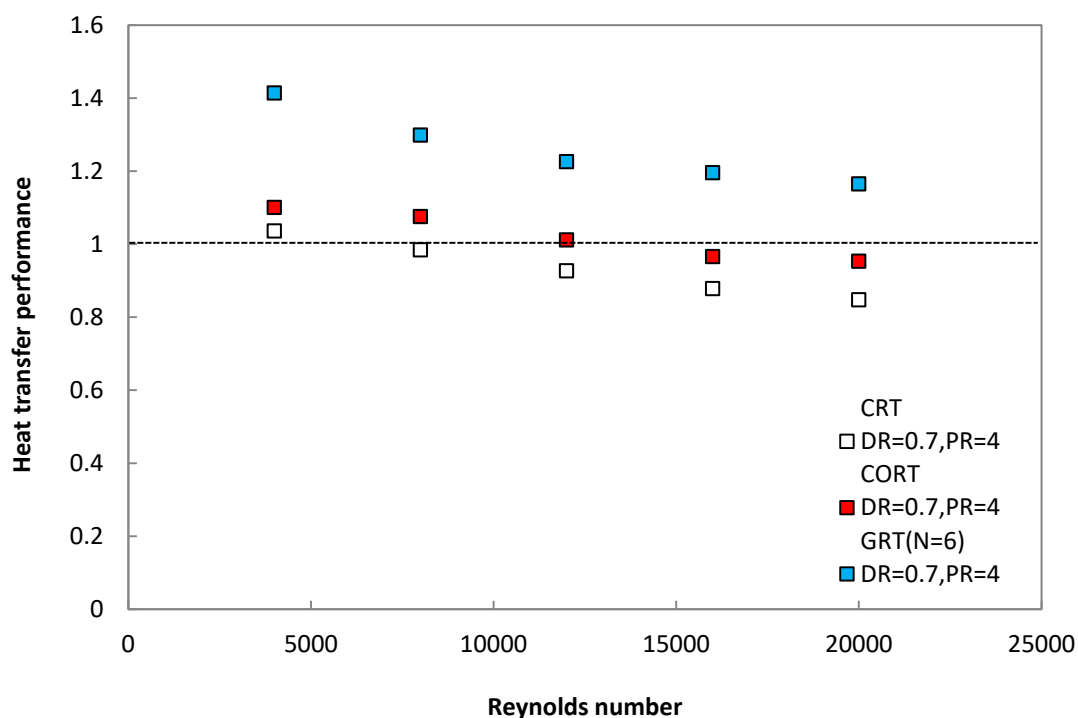
การถ่ายเทความร้อนที่มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.42 เท่าของท่อกลมผิวเรียบที่ค่า $Re = 4,000$ ซึ่งมีหลักเกณฑ์การวัดค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงรายละเอียดใน 4.2.3



รูปที่ 5.61 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนรูปแบบต่างๆ

รูปที่ 5.61 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนรูปแบบต่างๆ ในกรณีที่ค่า $DR = 0.5, 0.6$ และ 0.7 และ $PR = 4$ สามารถสรุปได้ว่า การติดตั้งด้วยเทอร์บิวเลเตอร์เพียงกรณีที่ค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ และโดยที่ $N = 6$ ให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด เป็นผลมาจากการ ผลกระทบของค่า DR ค่า PR และค่า N โดยค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.42 เท่าของท่อกลมผิวเรียบที่ค่า $Re = 4,000$ สำหรับการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวน

วงกลม และเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยที่มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดเท่ากับ 1.03 และ 1.10 เท่าของท่อกลมผิวเรียบ ตามลำดับ โดยที่ค่า $Re = 4,000$ เช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.62 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนรูปแบบต่างๆ ในกรณีที่มีค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$

รูปที่ 5.62 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนรูปแบบต่างๆ ในกรณีที่มีค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ สามารถสรุปได้ว่า การติดตั้งด้วยเทอร์บิวเลเตอร์เพียงโดยที่ $N = 6$ ให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่เพิ่มขึ้น 30% ถึง 38% เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม และเพิ่มขึ้น 22% ถึง 30% เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย เมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง และอัตราส่วนระยะห่างที่เท่ากัน (กรณีที่มีค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$) พบว่า เทอร์บิวเลเตอร์เพียงมีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด ทั้งนี้เป็นผลกระทบจากจำนวนช่องที่ถูกตัดออก (N) โดยทำให้ค่าความดันตกคร่อม และสัมประสิทธิ์แรงเสียด

ทานลดลง และยังสามารถสรุปได้ว่า ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าลดลง เมื่อค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

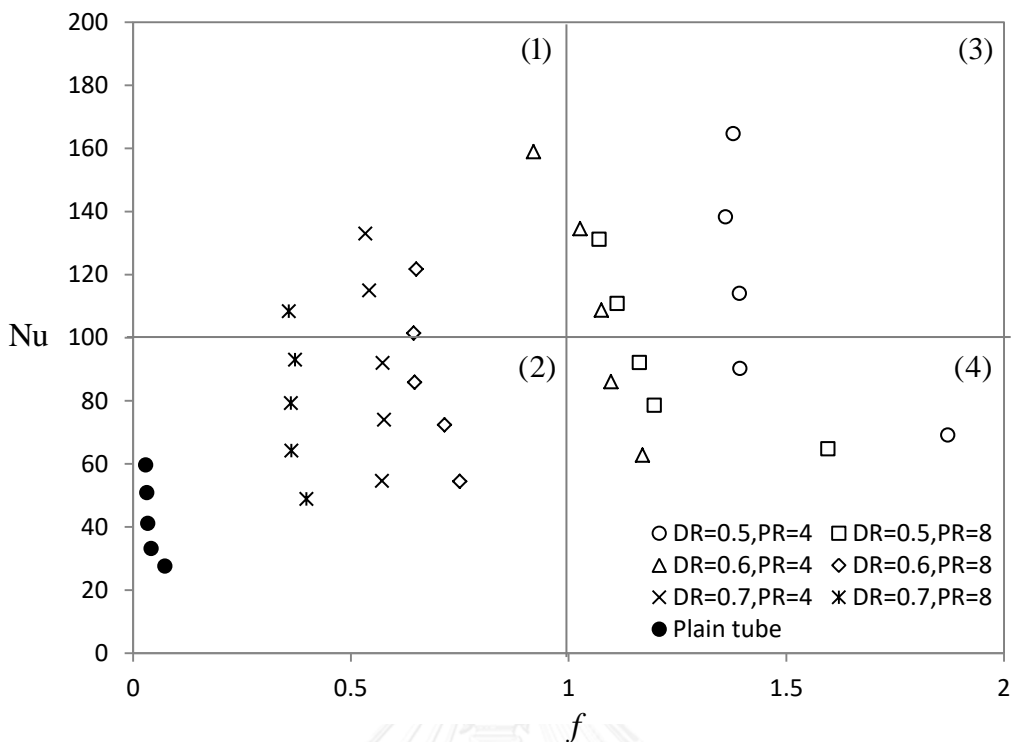
5.7 การเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์

การเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์มิวเลเตอร์จะทำการแบ่งออกเป็น 4 ช่วง โดยแต่ละช่วงนั้นมีความหมายเชิงคุณภาพดังต่อไปนี้

ช่วงที่ (1) $Nu \uparrow f \downarrow$ หมายถึง กรณีที่มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมาก และค่าความดันตกคร่อมต่ำ โดยช่วงนี้เป็นช่วงที่มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับที่ดีที่สุด

ช่วงที่ (2) $Nu \downarrow f \downarrow$ และ ช่วงที่ (3) $Nu \uparrow f \uparrow$ ไม่สามารถบอกได้แน่ชัดว่าช่วงไหนมีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับที่ดีกว่ากัน เพราะทั้งสองช่วงนี้มีข้อดีและข้อเสียต่างกัน โดยทั้งสองช่วงนี้เป็นช่วงที่มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับปานกลาง

ช่วงที่ (4) $Nu \downarrow f \uparrow$ หมายถึง กรณีที่มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ และค่าความดันตกคร่อมสูงมาก โดยช่วงนี้เป็นช่วงที่มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับแย่มากที่สุด



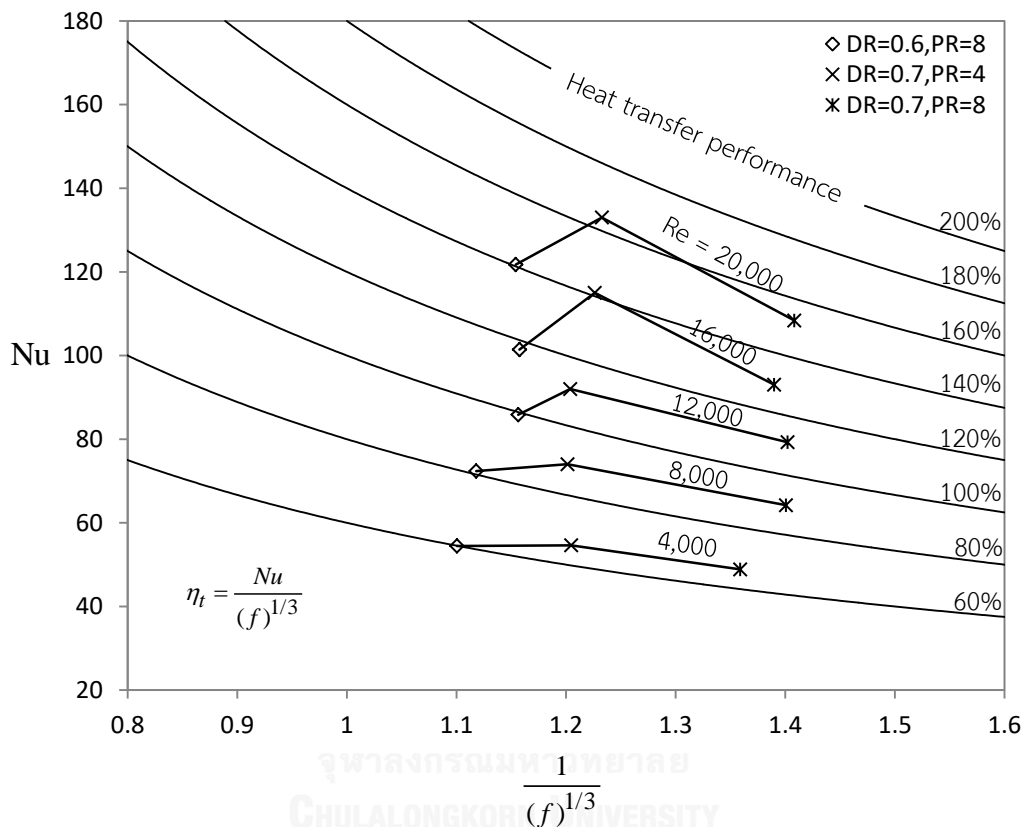
รูปที่ 5.63 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสัณฐานเบอร์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT

รูปที่ 5.63 แสดงการเปรียบเทียบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสัณฐานเบอร์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมกรณีที่มีค่า DR = 0.5, 0.6 และ 0.7 และ PR = 4 และ 8 จากการเปรียบเทียบสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 5.3 โดยช่วงที่มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับที่ดีที่สุดคือ ช่วงที่ (1)

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT)

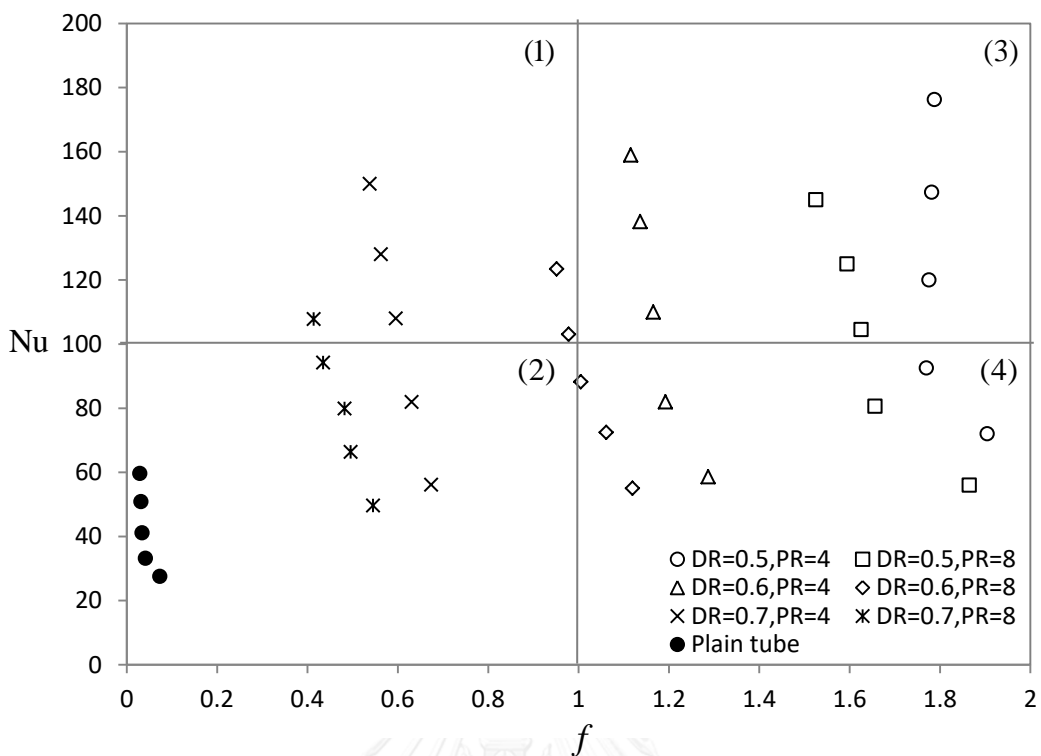
Case \ Re	DR = 0.5 PR = 4	DR = 0.5 PR = 8	DR = 0.6 PR = 4	DR = 0.6 PR = 8	DR = 0.7 PR = 4	DR = 0.7 PR = 8	Plain tube
4,000	(4)	(4)	(4)	(2)	(2)	(2)	(2)
8,000	(4)	(4)	(4)	(2)	(2)	(2)	(2)
12,000	(3)	(4)	(3)	(2)	(2)	(2)	(2)
16,000	(3)	(3)	(3)	(1)	(1)	(2)	(2)
20,000	(3)	(3)	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)

ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม (CRT) พบว่าค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับดีที่สุดคือ กรณีที่ค่า DR = 0.6 และ PR = 8 และกรณีที่ค่า DR = 0.7 และ PR = 4 และ 8 (ช่วงที่ (1)) สามารถหาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้แสดงดังรูปที่ 5.64



รูปที่ 5.64 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CRT

รูปที่ 5.64 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสำหรับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมกรณีที่มีค่า DR = 0.6 และ PR = 8 และกรณีที่ค่า DR = 0.7 และ PR = 4 และ 8 ที่มีค่า Re = 4,000 ถึง 20,000 ซึ่งแสดงได้ตามลักษณะเส้นตรงสีแดงของแต่ละช่วง และมีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ (Heat transfer performance, η_t) เป็นแฟกเตอร์ที่บ่งบอกถึงค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีรูปแบบสมการคล้ายคลึงกับสมการของ Webb [34] จากรูปดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นว่า กรณีที่มีค่า DR = 0.7 และ PR = 4 ที่มีค่า Re = 20,000 มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดสำหรับกรณีของ CRT เท่ากับ 164 %



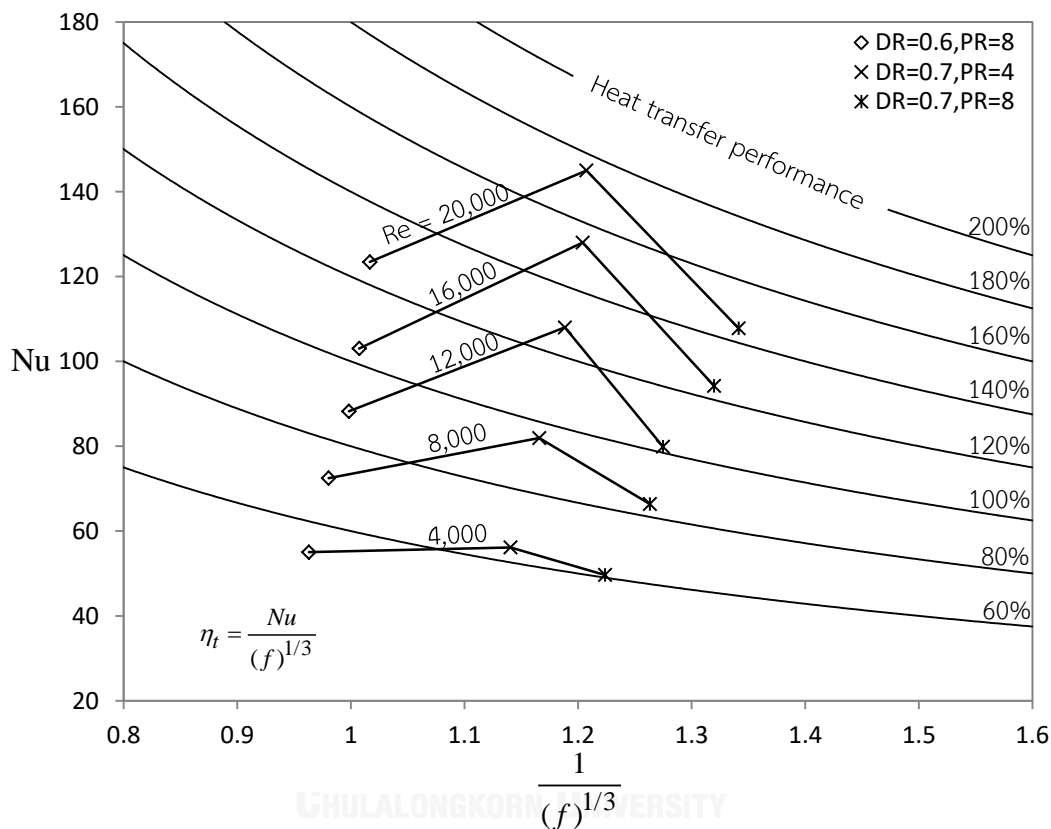
รูปที่ 5.65 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสัณฐานเบอร์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CORT

รูปที่ 5.65 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสัณฐานเบอร์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยกรณีที่มีค่า DR = 0.5, 0.6 และ 0.7 และ PR = 4 และ 8 จากการเปรียบเทียบสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 5.4 โดยช่วงที่มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับดีที่สุดคือ ช่วงที่ (1)

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย (CORT)

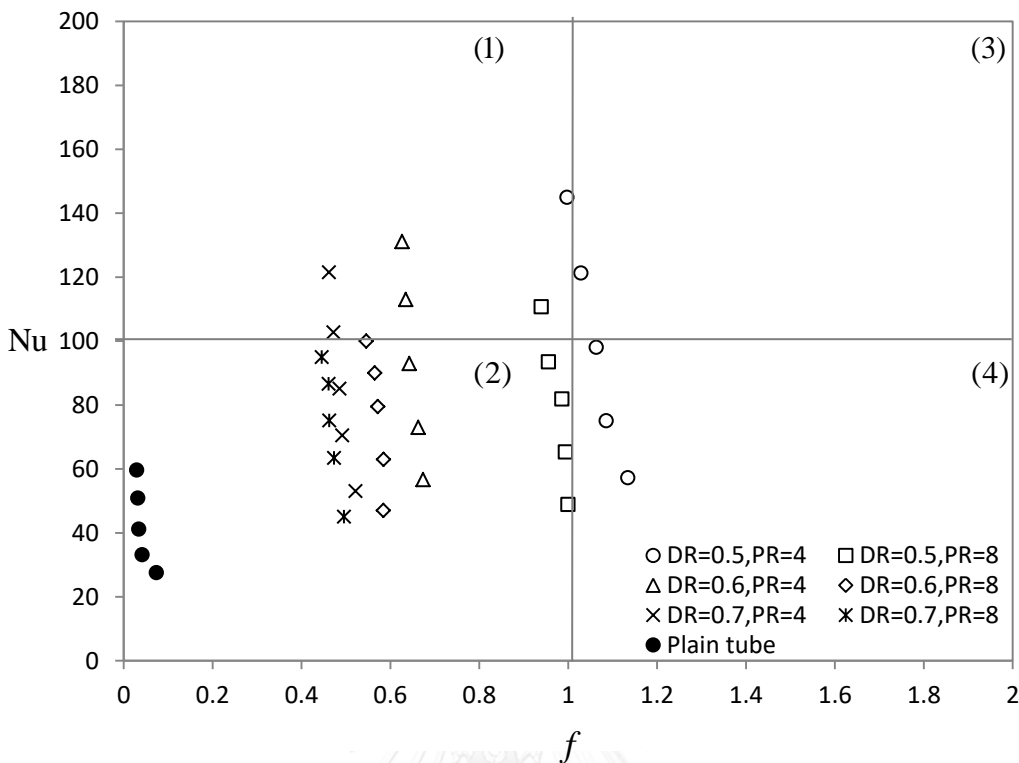
Case \ Re	DR = 0.5 PR = 4	DR = 0.5 PR = 8	DR = 0.6 PR = 4	DR = 0.6 PR = 8	DR = 0.7 PR = 4	DR = 0.7 PR = 8	Plain tube
4,000	(4)	(4)	(4)	(4)	(2)	(2)	(2)
8,000	(4)	(4)	(4)	(4)	(2)	(2)	(2)
12,000	(3)	(3)	(3)	(4)	(1)	(2)	(2)
16,000	(3)	(3)	(3)	(1)	(1)	(2)	(2)
20,000	(3)	(3)	(3)	(1)	(1)	(1)	(2)

ตารางที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกรวย (CORT) พบว่ากรณีที่มีค่า DR = 0.6 และ PR = 8 และกรณีที่มีค่า DR = 0.7 และ PR = 4 และ 8 ให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับดีที่สุดในช่วงที่ (1) สามารถหาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้แสดงดังรูปที่ 5.66



รูปที่ 5.66 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ CORT

รูปที่ 5.66 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสำหรับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยกรณีที่มีค่า DR = 0.6 และ PR = 8 และกรณีที่มีค่า DR = 0.7 และ PR = 4 และ 8 ที่มีค่า Re = 4,000 ถึง 20,000 จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า กรณีที่มีค่า DR = 0.7 และ PR = 4 ที่มีค่า Re = 20,000 มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดในกรณีของ CORT เท่ากับ 175 %



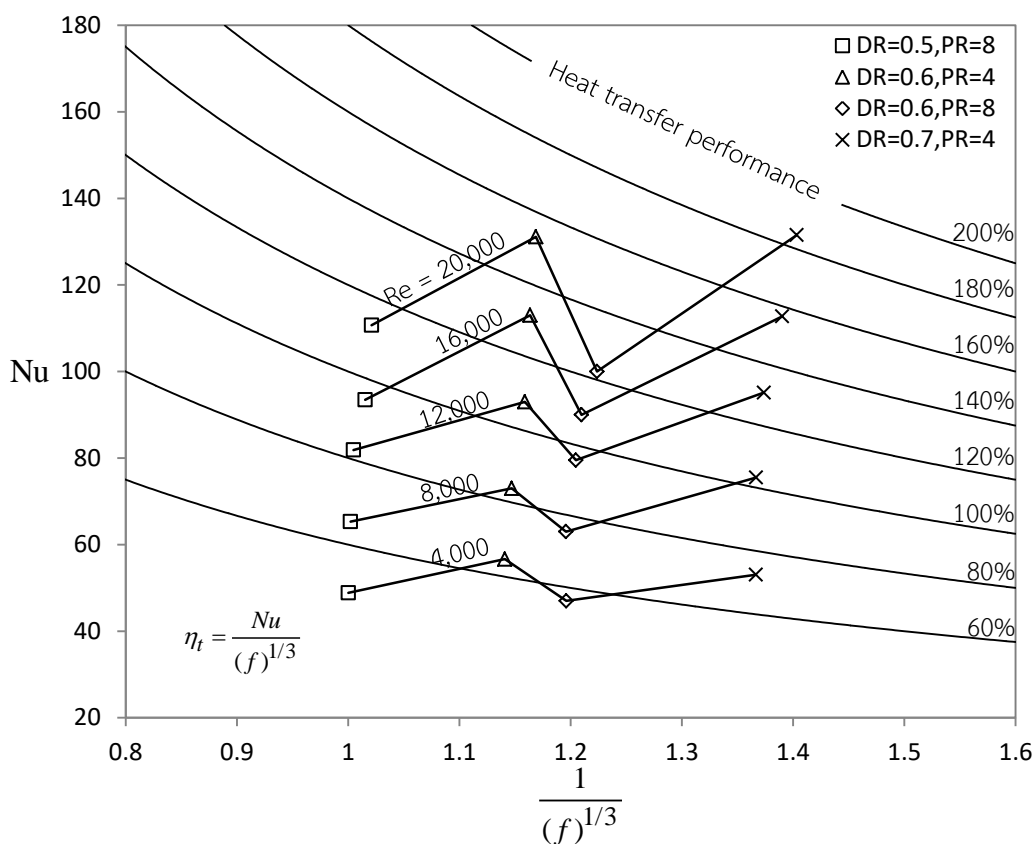
รูปที่ 5.67 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสโตว์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT ($N = 6$)

รูปที่ 5.67 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสโตว์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียงกรณีที่มีค่า $DR = 0.5, 0.6$ และ 0.7 และ $PR = 4$ และ 8 และ $N = 6$ จากการเปรียบเทียบสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 5.5 โดยช่วงที่มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับดีที่สุดคือ ช่วงที่ (1)

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียง (GRT) กรณีที่มีค่า $N = 6$

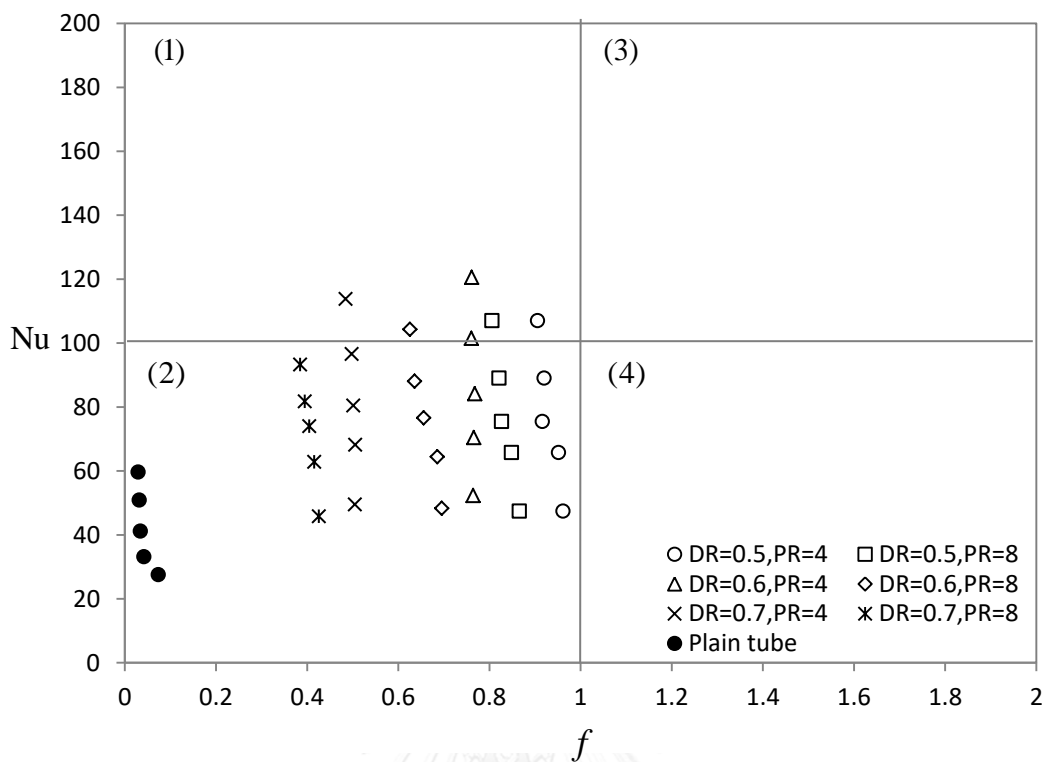
Case \ Re	DR = 0.5 PR = 4	DR = 0.5 PR = 8	DR = 0.6 PR = 4	DR = 0.6 PR = 8	DR = 0.7 PR = 4	DR = 0.7 PR = 8	Plain tube
4,000	(4)	(4)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
8,000	(4)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
12,000	(4)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
16,000	(3)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(2)
20,000	(3)	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)

ตารางที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียง (GRT) กรณีที่ค่า $N = 6$ พบว่ากรณีที่ค่า $DR = 0.5$ และ $PR = 8$ กรณีที่ค่า $DR = 0.6$ และ $PR = 4$ และ 8 และกรณีที่ค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ ให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับดีที่สุด (ช่วงที่ (1)) สามารถหาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้แสดงดังรูปที่ 5.68



รูปที่ 5.68 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT กรณีที่ค่า $N = 6$

รูปที่ 5.68 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสำหรับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียงกรณีค่า $DR = 0.5$ และ $PR = 8$ กรณีที่ค่า $DR = 0.6$ และ $PR = 4$ และ 8 และกรณีที่ค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า กรณีที่ค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 20,000$ มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดสำหรับกรณีของ GRT กรณีที่ค่า $N = 6$ เท่ากับ 185 %



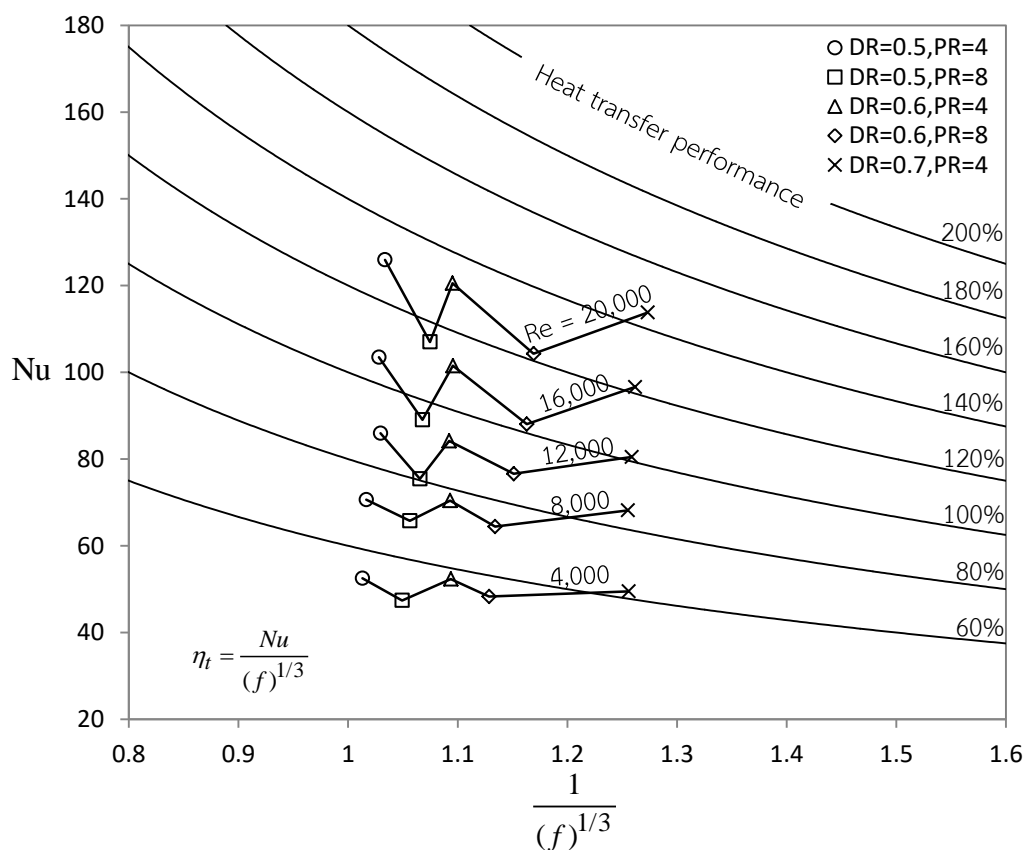
รูปที่ 5.69 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสโตกส์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT ($N = 8$)

รูปที่ 5.69 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสโตกส์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์โมวิลเตอร์วางแหวนเพียงกรณีที่มีค่า $DR = 0.5, 0.6$ และ 0.7 และ $PR = 4$ และ 8 และ $N = 8$ จากการเปรียบเทียบสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 5.6 โดยช่วงที่มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับดีที่สุดคือ ช่วงที่ (1)

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์โมวิลเตอร์วางแหวนเพียง (GRT) กรณีที่มีค่า $N = 8$

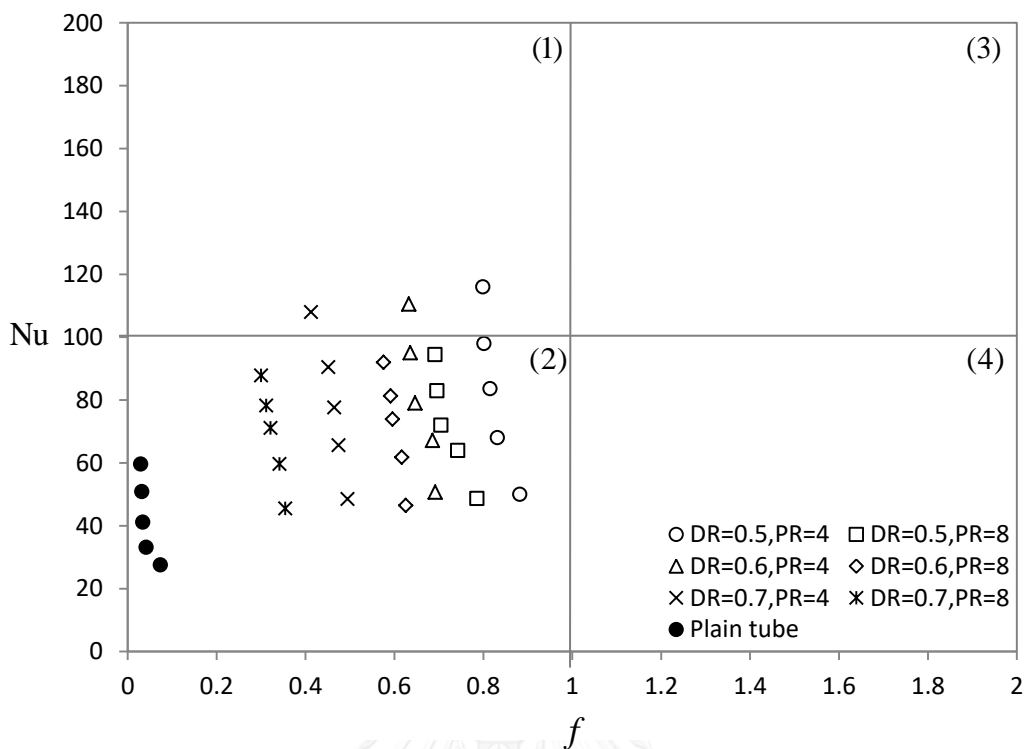
Case \ Re	DR = 0.5 PR = 4	DR = 0.5 PR = 8	DR = 0.6 PR = 4	DR = 0.6 PR = 8	DR = 0.7 PR = 4	DR = 0.7 PR = 8	Plain tube
4,000	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
8,000	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
12,000	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
16,000	(2)	(2)	(1)	(2)	(2)	(2)	(2)
20,000	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)

ตารางที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียง (GRT) กรณีที่ค่า $N = 8$ พบว่ากรณีที่ค่า $DR = 0.5$ และ $PR = 4$ และ 8 กรณีที่ค่า $DR = 0.6$ และ $PR = 4$ และ 8 และกรณีที่ค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ ให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับดีที่สุด (ช่วงที่ (1)) สามารถหาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้แสดงดังรูปที่ 5.70



รูปที่ 5.70 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT กรณีที่ค่า $N = 8$

รูปที่ 5.70 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสำหรับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยกรณีค่า $DR = 0.5$ และ $PR = 4$ และ 8 กรณีที่ค่า $DR = 0.6$ และ $PR = 4$ และ 8 และกรณีที่ค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า กรณีที่ค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 20,000$ มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดสำหรับกรณีของ GRT กรณีที่ค่า $N = 8$ เท่ากับ 145 %



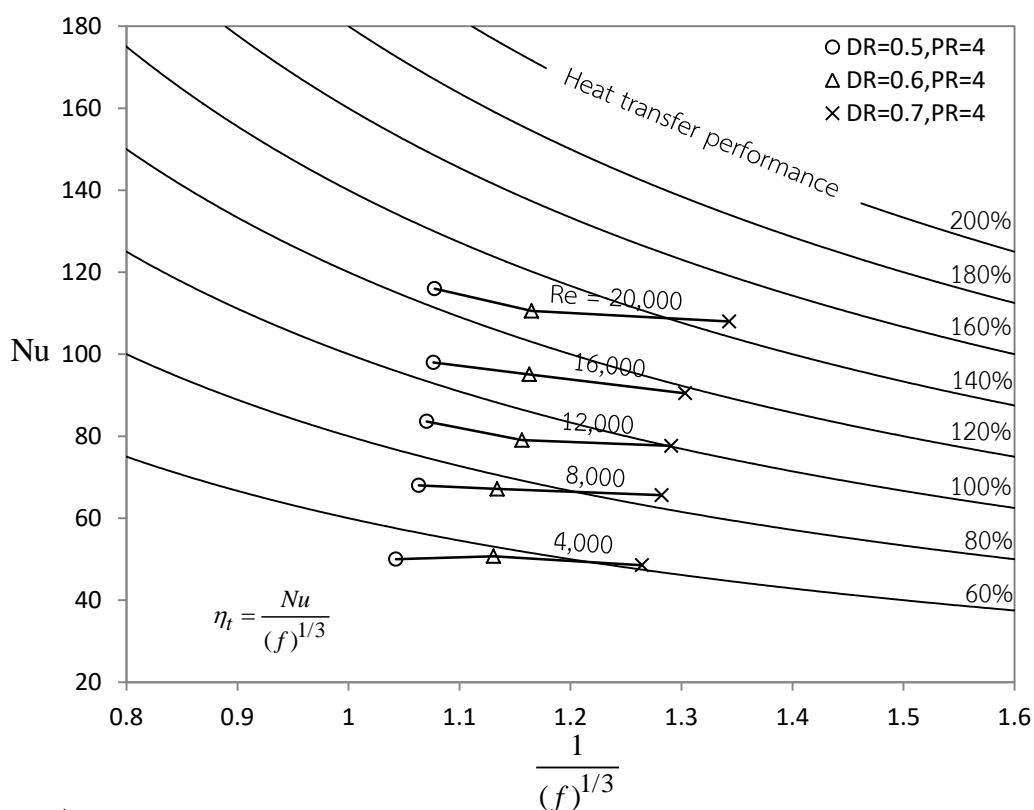
รูปที่ 5.71 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสโตว์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT ($N = 10$)

รูปที่ 5.71 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสโตว์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์โมวอลเตอร้งแหวนเพียงกรณีที่มีค่า $DR = 0.5, 0.6$ และ 0.7 และ $PR = 4$ และ 8 และ $N = 10$ จากการเปรียบเทียบสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 5.7 โดยช่วงที่มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับดีที่สุดคือ ช่วงที่ (1)

ตารางที่ 5.7 การเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์โมวอลเตอร้งแหวนเพียง (GRT) กรณีที่มีค่า $N = 10$

Case \ Re	DR = 0.5 PR = 4	DR = 0.5 PR = 8	DR = 0.6 PR = 4	DR = 0.6 PR = 8	DR = 0.7 PR = 4	DR = 0.7 PR = 8	Plain tube
4,000	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
8,000	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
12,000	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
16,000	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
20,000	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(2)

ตารางที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบช่วงระดับของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเพียง (GRT) กรณีที่ค่า $N = 8$ พบว่ากรณีที่ค่า $DR = 0.5$ และ $PR = 4$ กรณีที่ค่า $DR = 0.6$ และ $PR = 4$ และกรณีที่ค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ ให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในระดับดีที่สุด (ช่วงที่ (1)) สามารถหาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้แสดงดังรูปที่ 5.72

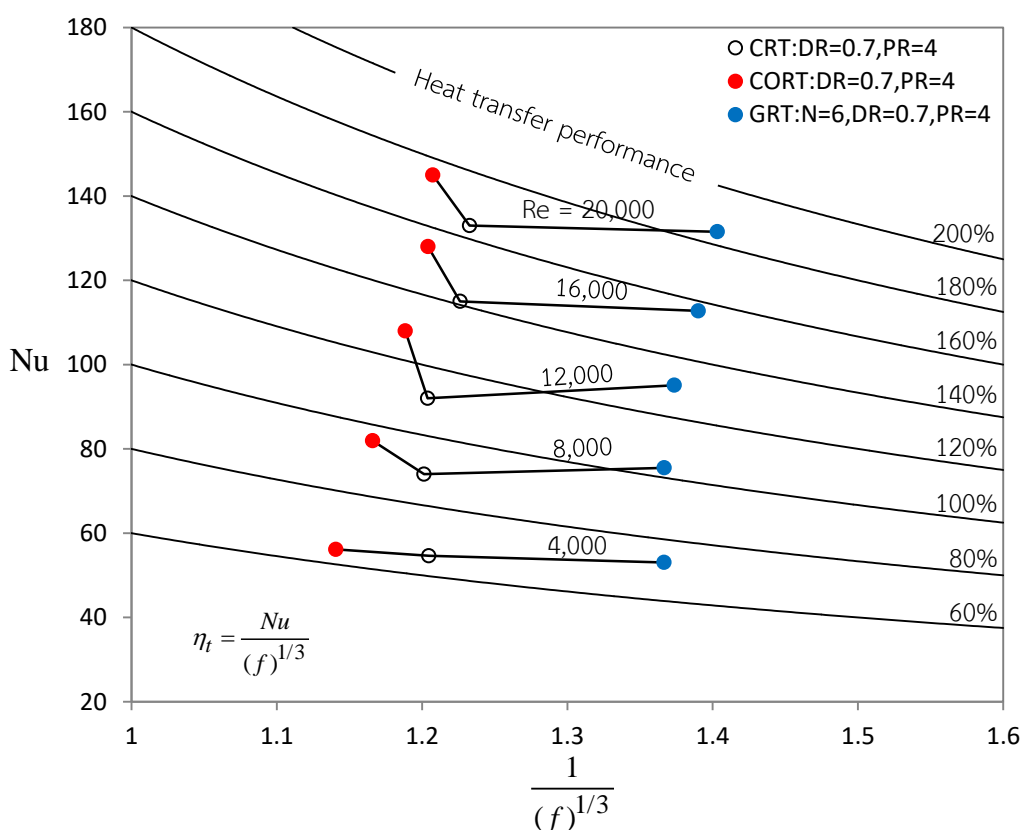


รูปที่ 5.72 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT กรณีที่ค่า $N = 10$

รูปที่ 5.72 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสำหรับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยกรณีที่มีค่า $DR = 0.5$ และ $PR = 4$ กรณีที่มีค่า $DR = 0.6$ และ $PR = 4$ และกรณีที่มีค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า กรณีที่มีค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 20,000$ มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดสำหรับกรณีของ GRT กรณีที่มีค่า $N = 10$ เท่ากับ 145 %

จากการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมสำหรับกรณีของ GRT พบว่า จำนวนช่องที่ถูกตัดออก (N) มีผลกระทบมากต่อการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน โดยค่า $N = 6, 8$ และ 10 มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 185%, 145% และ 145% ตามลำดับ จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถคาดการณ์ได้ว่า ถ้าจำนวนช่องมีค่า $N > 10$ จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากค่า $N = 8$ และ 10 มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเท่ากันคือ 145%

สำหรับการศึกษาค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ พบว่า ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดเกิดขึ้นในกรณีที่ค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ ดังนั้นสามารถนำกรณีดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพื่อให้ตรวจสอบได้โดยง่ายดังรูปที่ 5.73



รูปที่ 5.73 การเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ

รูปที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสำหรับท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ กรณีที่ค่า $DR = 0.7$ และ $PR = 4$ ที่ค่า $Re = 4,000$ ถึง $20,000$ จาก การเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบเพียงที่ค่า $N = 6$ มีค่า สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 185% รองลงมาคือ เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย เท่ากับ 175% และสุดท้ายคือ เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลมเท่ากับ 164%

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมที่ติดตั้ง เทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถ หรือสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน ระหว่างท่อกลมที่มีการติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่า สำหรับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลม โดยการเพิ่มระดับความเร็วและระดับ ความปั่นป่วนของของไหลภายในท่อกลมจะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบควรคำนึงถึงค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อกลมด้วย เช่น ในกรณีที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่น้อยที่สุด ($DR = 0.5$) และ อัตราส่วนระยะห่างที่น้อย ที่สุด ($PR = 4$) ที่ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุดในเทอร์บิวเลเตอร์ทุกรูปแบบ แต่กลับส่งผล ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วย และทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าที่ไม่ดีนัก จึง ได้นำเทคนิคในการลดค่าความดันตกคร่อม และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อกลมด้วย วิธีการตัดบางส่วนออก (Cut-out) ซึ่งช่วยลดการเกิดช่วงการไหลหมุนวน (Recirculation region) และพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat transfer area) โดยที่ผลที่ได้ออกมา นั้นทำให้ค่าความดันตก คร่อมลดน้อยลง และค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงไม่มากนัก ซึ่งส่งผลให้ให้ความสามารถ หรือ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงการวิเคราะห์การศึกษาพฤติกรรมการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อน ความดันตกคร่อม และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มร่วมกับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน โดยการศึกษาของไหล ที่มีการไหลอยู่ในสภาวะคงตัวและเป็นชนิดอัดตัวไม่ได้ คุณสมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่ตลอดทั้งขอบเขตที่พิจารณา การไหลเกิดใน 3 มิติ ซึ่งจากผลการคำนวณที่ได้จากการสอบเทียบกับสมการความสัมพันธ์และผลการทดลองที่มีผู้ทำไว้แล้วจะเห็นได้ว่า โปรแกรมที่ใช้คำนวณทางคอมพิวเตอร์สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ได้เป็นที่น่าพอใจและมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปวิเคราะห์การไหลในลักษณะที่สนใจต่อไป

สำหรับลักษณะการไหลจะพิจารณาสำหรับการไหลภายในท่อกลม และมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ ที่สามารถทำนายคุณลักษณะการไหลโดยทั่วไปได้ รายละเอียดได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 สำหรับการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มจะต้องเริ่มต้นจากสมการควบคุมพื้นฐานและลักษณะของปัญหา โดยสมการต่างๆ ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 โดยประกอบไปด้วย สมการความต่อเนื่อง สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน ในรูปแบบ 3 มิติ โดยการคำนวณจะแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยๆ ด้วยวิธีการสร้างกริดเพื่อใช้ในการคำนวณ จากนั้นทำการกระจายพจน์ของเทอมการพาเพื่อให้เป็นสมการพีชคณิตโดยใช้ Numerical scheme แบบ QUICK ซึ่งเป็น Differencing Scheme ที่มีความถูกต้องในอันดับที่สอง (2^{nd} order scheme) และจากสมการพีชคณิตจึงทำการแก้สมการด้วยวิธี Tri-diagonal matrix algorithm (TDMA) แบบ Line-by-line ร่วมกับ SIMPLE [31] เพื่อช่วยในการหาผลเฉลยที่มีค่าความเร็วและความดันสอดคล้องกัน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรมเพื่อจำลองลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนร่วมกับวิธีไฟไนต์วอลุ่มจะถูกนำมาตรวจสอบความถูกต้องกับผลที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้ โดยสามารถแบ่งการตรวจสอบได้ออกเป็น 2 ส่วนคือ การถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อมภายใน

ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ โดยลักษณะของปัญหาคือ การไหลแบบปั่นป่วนผ่านอุปกรณ์เทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบวงแหวนวงกลม จากการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยทำการเปรียบเทียบพบว่า จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องและมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับผลที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยของหน้านี้ แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 4

สำหรับบทที่ 5 ได้แสดงผลลัพธ์ที่ได้คำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยลักษณะของปัญหาสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบคือ ท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม เทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย และเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟือง โดยทำการศึกษาผลที่ได้จากการคำนวณคือ ค่าสเตรสสัมบูรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. จากการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์ พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์แบบวงแหวนวงกลมและแบบวงแหวนกรวยเพิ่มขึ้น 87% ถึง 199% เมื่อเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ และในกรณีของเทอร์บิวเลเตอร์แบบวงแหวนกรวยเพิ่มขึ้น 3% ถึง 8% เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์บิวเลเตอร์แบบวงแหวนวงกลม

2. การติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม และเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าไม่ดันทัก จึงได้ใช้เทคนิคการตัดบางส่วนออก (Cut-out) บริเวณพื้นผิวรอบวงของเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวยให้มีลักษณะรูปร่างที่เปลี่ยนไปเป็นเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนเฟืองเพื่อลดการเกิดช่วงการไหลหมุนวน (Recirculation region) ซึ่งบริเวณที่ของไหลหมุนวนด้านหลังของเทอร์บิวเลเตอร์ จะมีผลทำให้ของไหลบริเวณนั้นมีความดันลดต่ำลง เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันค่อนข้างมากบริเวณดังกล่าว

3. ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์เฟืองให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด สำหรับเทอร์บิวเลเตอร์ที่ติดตั้งด้วยอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (DR) เท่ากับ 0.7 อัตราส่วนระยะห่าง (PR) เท่ากับ 4 และจำนวนช่องที่ถูกตัดออก (N) เท่ากับ 6 โดยค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.42 เท่าของท่อผิวเรียบ ที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์

เท่ากับ 4,000 โดยค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 30% ถึง 38% เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนวงกลม และเพิ่มขึ้น 22% ถึง 30% เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์บิวเลเตอร์วงแหวนกรวย และยังสามารถสรุปได้ว่า ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าลดลง เมื่อค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

4. จากการใช้วิธีเปรียบเทียบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้อง และมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับสมการการหาค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (สมการ (4.7) อ้างอิงจาก Webb[34]) ทำให้มีความมั่นใจในระดับหนึ่งว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนั้นมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. สำหรับการออกแบบเทอร์บิวเลเตอร์เพื่อใช้ในการเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม ควรออกแบบให้มีลักษณะที่ไม่ซับซ้อนมากเกินไป เนื่องจากการคำนวณด้วยโปรแกรมจะต้องใช้ความละเอียดสูงซึ่งมีผลต่อระยะเวลาการคำนวณ เช่น การสร้างกริดเพื่อใช้ในการคำนวณลักษณะการไหล เป็นต้น รวมไปถึงควรคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการผลิตเทอร์บิวเลเตอร์เพื่อใช้งานจริงด้วย

2. นำเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ ไปประยุกต์ใช้งานกับท่อที่มีลักษณะแตกต่างกัน เช่น ท่อกลมแนวโค้ง ท่อสี่เหลี่ยม ท่อสี่เหลี่ยมโค้ง เพื่อพิจารณาลักษณะการไหล การถ่ายเทความร้อน รวมไปถึงค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

3. จำลองลักษณะการไหลภายในท่อกลมโดยใช้เทอร์บิวเลเตอร์ที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนมากขึ้น โดยคำนึงถึงขั้นตอนการขึ้นรูปเพื่อใช้งานจริงด้วย

4. จำลองลักษณะการไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ

5. จำลองลักษณะการไหลเพื่อทำนายอัตราการเกิดการผสมระหว่างของไหลภายในท่อกลมที่ติดตั้งเทอร์บิวเลเตอร์รูปแบบต่างๆ

รายการอ้างอิง



1. EUROSPIRAL COMPANY (1997), The turbulators (Online), Available :
<http://www.eurospiral.com/main.aspx> [2016 March 15].
2. FUEL EFFICIENCY (1973), The Turbulator configurations (Online), Available :
<http://www.fuelefficiencyllc.com/about.html> [2016 March 15].
3. Concept Engineering International (2003), Turbulator Division (Online),
Available : <http://www.allturbulators.com> [2016 March 15].
4. Kongkai-paiboon, V., Nanan, K., and Eiamsa-ard, S., Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators. International Communications in Heat and Mass Transfer, 37(5) (2010B): 568-574.
5. Kongkai-paiboon, V., Nanan, K., and Eiamsa-ard, S., Experimental investigation of heat transfer and turbulent flow friction in a tube fitted with perforated conical-rings. International Communications in Heat and Mass Transfer, 37(5) (2010A): 560-567.
6. Kumar, A., Chamoli, S., and Kumar, M., Experimental investigation on thermal performance and fluid flow characteristics in heat exchanger tube with solid hollow circular disk inserts. Applied Thermal Engineering, 100 (2016): 227-236.
7. Acir, A., Ata, İ., and Canlı, M., Investigation of effect of the circular ring turbulators on heat transfer augmentation and fluid flow characteristic of solar air heater. Experimental Thermal and Fluid Science, 77 (2016): 45-54.
8. Yakut, K. and Sahin, B., Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers. Applied Energy, 78(3) (2004A): 273-288.
9. Yakut, K., Sahin, B., and Canbazoglu, S., Performance and flow-induced vibration characteristics for conical-ring turbulators. Applied Energy, 79(1) (2004B): p. 65-76.

10. Eiamsa-ard, S. and Promvonge, P., Experimental investigation of heat transfer and friction characteristics in a circular tube fitted with V-nozzle turbulators. International Communications in Heat and Mass Transfer, 33(5) (2006): 591-600.
11. Promvonge, P. and Eiamsa-ard, S., Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted-tape insert. International Communications in Heat and Mass Transfer, 34(7) (2007): 849-859.
12. Akhavan-Behabadi, M.A., Salimpour, M.R., and Pazouki, V.A., Pressure drop increase of forced convective condensation inside horizontal coiled wire inserted tubes. International Communications in Heat and Mass Transfer, 35(9) (2008): 1220-1226.
13. Sukchana, T., Heat transfer enhancement of the double pipe heat exchanger with wire Inserts. Master thesis, Department of Mechanical Engineering, Srinakharinwirot University, 2009.
14. Thianpong, C., Yongsiri, K., Nanan, K., and Eiamsa-ard, S., Thermal performance evaluation of heat exchangers fitted with twisted-ring turbulators. International Communications in Heat and Mass Transfer, 39(6) (2012): 861-868.
15. Muthusamy, C., Vivar, M., Skryabin, I., and Srithar, K., Effect of conical cut-out turbulators with internal fins in a circular tube on heat transfer and friction factor. International Communications in Heat and Mass Transfer, 44 (2013): 64-68.
16. Duangthongsuk, W. and Wongwises, S., An experimental investigation of the heat transfer and pressure drop characteristics of a circular tube fitted with rotating turbine-type swirl generators. Experimental Thermal and Fluid Science, 45 (2013A): 8-15.
17. Duangthongsuk, W. and Wongwises, S., Comparison of the heat transfer performance and friction characteristics between fixed and rotating turbine-type swirl generators fitted in a small circular tube. Experimental Thermal and Fluid Science, 50 (2013B): 222-228.

18. Panyarattana, K. and Putivisutisak, S., Numerical analysis of channel flow over two blocks in tandem arrangement. The 16th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Phuket, Thailand. (2002): 172-177.
19. Kauwaranyu, K., Numerical study of turbulent flow and heat transfer in gas turbine blade with turbulator, Master thesis, Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, 2003.
20. Akansu, S.O., Heat transfers and pressure drops for porous-ring turbulators in a circular pipe. Applied Energy, 83 (2006): 280-298.
21. Pathipakka, G. and Sivashanmugam, P., Heat transfer behaviour of nanofluids in a uniformly heated circular tube fitted with helical inserts in laminar flow. Superlattices and Microstructures, 47(2) (2010): 349-360.
22. Rao, Y., Li, B., and Feng, Y., Heat transfer of turbulent flow over surfaces with spherical dimples and teardrop dimples. Experimental Thermal and Fluid Science, 61 (2015): 201-209.
23. Launder, B.E. and Spalding, D.B., The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3 (1974): 269-289.
24. Patankar, S.V. and Spalding, D.B., A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. International Journal of Heat and Mass Transfer, 15 (1972): 1787-1806.
25. Sloan, D.G., Smith, P.J., and Smoot, L.D., Modeling of swirl in turbulent flow systems. Progress in Energy Combustion Science, 12 (1986): 163-250.
26. Wilcox, D.C., Turbulence Modeling for CFD. California: DCW Industries, Inc., 1993.
27. Mansour, N.N., Kim, J., and Moin, P., Reynolds-stress and dissipation rate budgets in a turbulent channel flow. Journal of Fluid Mechanics, 194 (1988): 15-44.
28. Bredberg, J., Peng, S.H., and Davidson, L., An improved turbulence model applied to recirculating flows. International Journal of Heat and Fluid Flow, 23 (2002): 731-743.

29. Durbin, P.A. and Reif, B.A.P., Statistical theory and modeling for turbulent flows. United Kingdom: John Wiley & Sons., 2001.
30. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., An introduction to Computational Fluid Dynamics. England: Pearson Education, 2007.
31. Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
32. Dittus, F.W. and Boelter, L.M.K., Heat transfer in automobile radiator of the tubular type. International Journal of Heat and Mass Transfer, 12 (1985): 3-22.
33. Fox, R.W. and McDonald, A.T., Introduction to Fluid Mechanics. Edition 5th New Delhi: John Wiley & Sons., 2001.
34. Webb, R.L., Principles of Enhanced Heat Transfer. New York: Jonh-Wiley & Sons., 1992.



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายโชติธัช จิตรบำรุง เกิดเมื่อวันที่ 4 เดือนมีนาคม พุทธศักราช 2534 จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เมื่อปีการศึกษา 2556 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2557



