

การวิจัยและพัฒนาแผ่นบิตในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข

NUMERICAL INVESTIGATION AND THERMAL IMPROVEMENT IN HEAT EXCHANGER WITH TWISTED TAPE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2557

การวิจัยและพัฒนาแผ่นปิดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข

NUMERICAL INVESTIGATION AND THERMAL IMPROVEMENT IN HEAT  
EXCHANGER WITH TWISTED TAPE



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน **คณะวิศวกรรมศาสตร์** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกส่งมอบให้ผู้อื่นโดยมิชอบของเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

NUMERICAL INVESTIGATION AND THERMAL IMPROVEMENT IN HEAT  
EXCHANGER WITH TWISTED TAPE



Krisadee Channiyom  
Sahapap Laorat  
Auttapon Poomjai

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิจัยและพัฒนาแผ่นบิดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข  
NUMERICAL INVESTIGATION AND THERMAL IMPROVEMENT IN HEAT  
EXCHANGER WITH TWISTED TAPE

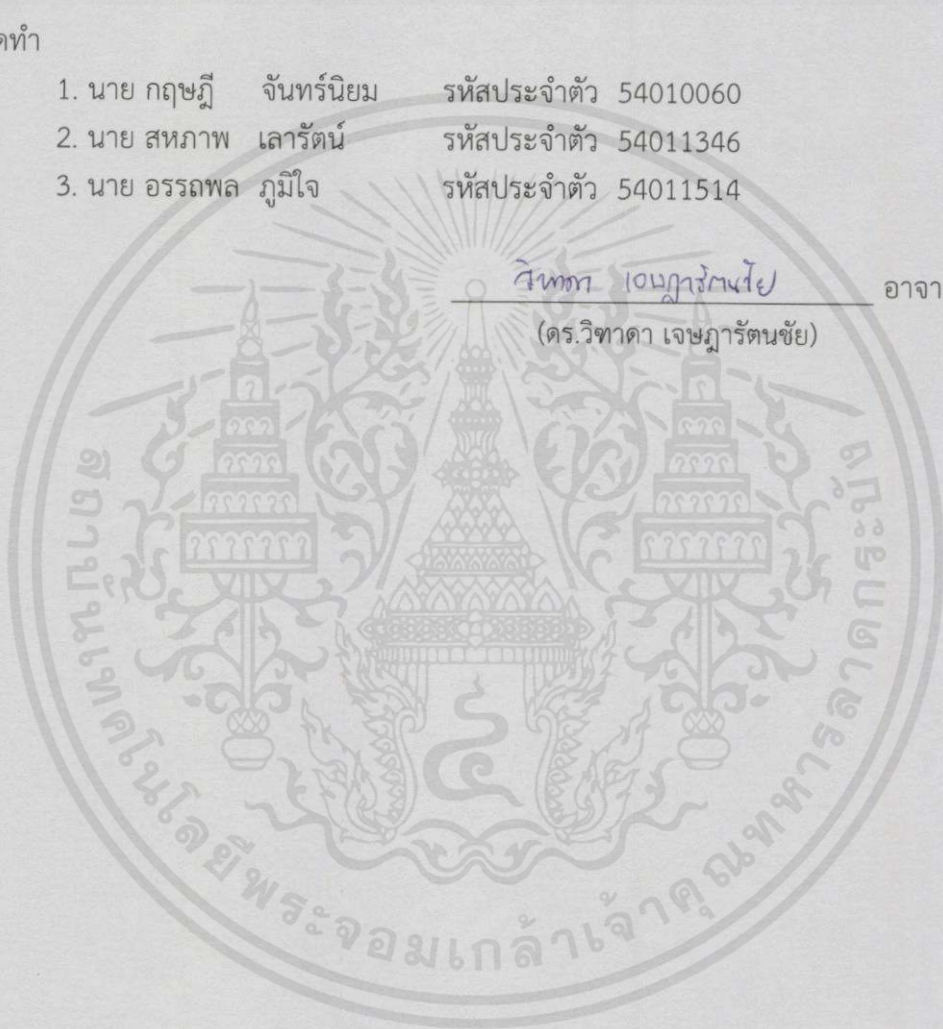
ผู้จัดทำ

1. นาย กฤษฏี จันทรนิยม รหัสประจำตัว 54010060
2. นาย สหภาพ เลารัตน์ รหัสประจำตัว 54011346
3. นาย อรรถพล ภูมิใจ รหัสประจำตัว 54011514

วิฑิต วัฒนทรัพย์

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.วิฑิตา เจษฎารัตนชัย)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิจัยและพัฒนาแผ่นบิดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข

นายกฤษฎี	จันทร์นิยม	54010060
นายสหภาพ	เลารัตน์	54011346
นายอรรถพล	ภูมิใจ	54011514
ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2557		

**บทคัดย่อ**

บทความนี้ได้นำเสนออิทธิพลของแผ่นบิดที่ดัดแปลง (modified twisted-tape) สำหรับการถ่ายเทความร้อน, ตัวประกอบเสียดทานและสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม โดยได้ทำการศึกษาดูด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น อัตราส่วนความกว้าง, อัตราส่วนความยาว, อัตราส่วนการบิด, รูปร่าง เป็นต้น ทำการศึกษาที่ค่าเลขเรย์โนลด์  $Re = 3000 - 20,000$  ผลที่ได้จากการศึกษาดูด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขจะนำเสนอในรูปแบบของลักษณะการไหล, พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน รวมทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษากับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่ได้มีการติดตั้งแผ่นบิดดัดแปลง การใช้แผ่นบิดดัดแปลงติดตั้งในท่อเพื่อให้เกิดการหมุนควงรวมทั้งเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนของของไหล ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในระบบถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น แผ่นบิดดัดแปลงไม่เพียงแต่เพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนเท่านั้นแต่ยังสามารถช่วยลดค่าความดันตกคร่อมได้อีกด้วยเมื่อเทียบกับตัวสร้างการไหลหมุนวนชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Numerical Investigation and Thermal Improvement in Heat Exchanger with Twisted tape

Kritsadee Channiyom 54010060

Sahapap Laorat 54011346

Auttapon Poomjai 54011514

Dr.Withada Jedsadaratanachai Advisor

Year 2557

### ABSTRACT

Effects of the modified twisted-tape on heat transfer, friction factor and thermal enhancement factor in a circular tube are presented. The parameters of the modified twisted-tape; width ratio, length ratio, twisted ratio, configuration, etc., are investigated numerically for Reynolds number based on the diameter of the circular tube,  $Re = 3000 - 20000$ . The numerical results are displayed in terms of flow configuration, heat transfer behavior, thermal performance evaluation, and also compared with the smooth circular tube with no twisted tape. The use of the modified twisted-tape is to generate swirling flow and increase the turbulence level of the fluid flow that helps to improve thermal performance in the heating system. The modified twisted-tape not only increases the heat transfer, but also reduces the pressure loss when compared with other turbulators.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยและพัฒนาแผ่นบิตในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ดร. วิชิตา เจษฎารัตนชัย อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก อีกทั้งคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการงานนี้ และขอบคุณพี่จเร พี่จิม และพี่พลอยที่สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำโครงการนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นาย กฤษฏี จันทร์นิยม  
นาย สหภาพ เสาร์รัตน์  
นาย อรรถพล ภูมิใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย	4
1.6 คำโครงการงานวิจัย	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	5
2.1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แผ่นบิด (Twisted Tape)	5
2.2 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แหวนกรวย (Conical Ring)	8
2.3 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ขดลวด (Wire Coil)	9
บทที่ 3 การไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ	11
3.1 สมการควบคุมของการไหลและการถ่ายเทความร้อน	11
3.1.1 การอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ	13
3.1.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอนุภาคการไหลในเทอมชิ้นส่วนย่อยของไหล	14
3.1.3 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ	17
3.1.4 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ	20
3.2 การไหลของของไหล	20
3.2.1 สภาวะการไหล	20
3.2.2 ความเร็วเฉลี่ย	21
3.2.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว	22
3.2.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว	24
3.3 การถ่ายเทความร้อน	25
3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย	26
3.3.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้ว	27
3.4 สหพันธ์การพาความร้อนของท่อไม่กลม	29
3.5 สมรรถนะเชิงความร้อน	30
บทที่ 4 การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	32
4.1 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข	32
4.2 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การประเมินสมรรถนะของการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	33
4.3.1 ความเข้ากันได้	34
4.3.2 เสถียรภาพการคำนวณ	34
4.3.3 การลู่เข้าของผลเฉลย	34
4.3.4 การอนุรักษ์	34
4.3.5 ความจำกัดขอบ	35
4.3.6 ความเสมือนจริง	35
4.3.7 ความแน่นอน	35
บทที่ 5 การกำหนดปัญหาและตรวจสอบความเหมาะสมแบบจำลอง	37
5.1 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย	37
5.2 สมการควบคุมและเงื่อนไขที่ทำการศึกษา	38
5.3 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ	38
5.4 การกำหนดลักษณะปัญหาที่ต้องการศึกษา	40
5.4.1 กรณีแผ่นบิตเจาะรู	40
5.4.2 กรณีอัตราส่วนการบิด	40
5.4.3 กรณีอัตราส่วนความยาว	41
5.4.4 กรณีอัตราส่วนความกว้าง	41
5.5 การตรวจสอบความแม่นยำของโปรแกรม	42
5.5.1 การตรวจสอบเหมาะสมของแบบจำลองจากจำนวนกริดเซลล์	42
5.5.2 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำตรง	42
5.5.3 การพิสูจน์ความถูกต้อง	44
บทที่ 6 โครงสร้างการไหล การถ่ายเทความร้อน ความดันตกคร่อม	45
6.1 บทนำ	45
6.2 โครงสร้างการไหลของแผ่นบิต	45
6.3 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์	45
6.3.1 Basic case (กรณีศึกษาขั้นพื้นฐาน)	46
6.3.1.1 เส้นกระแสการไหล	46
6.3.1.2 การถ่ายเทความร้อน	47
6.3.1.3 ความดันตกคร่อม	50
6.3.1.4 สมรรถนะการเพิ่มความร้อน	50
6.3.2 อัตราส่วนการบิดเท่ากับ 2	51
6.3.2.1 เส้นกระแสการไหล	51
6.3.2.2 การถ่ายเทความร้อน	51
6.3.2.3 ความดันตกคร่อม	54
6.3.2.4 สมรรถนะการเพิ่มความร้อน	54
6.3.3 อัตราส่วนความยาวเท่ากับ 11.14	55
6.3.3.1 เส้นกระแสการไหล	55
6.3.3.2 การถ่ายเทความร้อน	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งไม่มีการเผยแพร่ในที่สาธารณะ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.3.3 ความดันตกคร่อม	58
6.3.3.4 สมรรถนะการเพิ่มความร้อน	59
6.3.4 อัตราส่วนความกว้างเท่ากับ 5.71	59
6.3.4.1 เส้นกระแสการไหล	59
6.3.4.2 การถ่ายเทความร้อน	60
6.3.4.3 ความดันตกคร่อม	62
6.3.4.4 สมรรถนะการเพิ่มความร้อน	63
6.4 อิทธิพลของอัตราส่วนการบิด	63
6.4.1 เส้นกระแสการไหล	64
6.4.2 การถ่ายเทความร้อน	65
6.4.3 ความดันตกคร่อม	67
6.5 อิทธิพลของอัตราส่วนความกว้าง	67
6.5.1 เส้นกระแสการไหล	68
6.5.2 การถ่ายเทความร้อน	69
6.5.3 ความดันตกคร่อม	71
6.5.4 สมรรถนะการเพิ่มความร้อน	71
6.6 อิทธิพลของอัตราส่วนความยาว	72
6.6.1 เส้นกระแสการไหล	72
6.6.2 การถ่ายเทความร้อน	73
6.6.3 ความดันตกคร่อม	75
6.6.4 สมรรถนะการเพิ่มความร้อน	75
6.7 โครงสร้างของแผ่นบิดในรูปแบบต่างๆหลังปรับปรุง	76
6.7.1 เส้นกระแสการไหล	76
6.7.2 การถ่ายเทความร้อน	77
6.7.3 ความดันตกคร่อม	80
6.7.4 สมรรถนะการเพิ่มความร้อน	81
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง	83
7.1 สรุปผลการทดลอง	83
7.2 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์	83
7.3 อิทธิพลของอัตราส่วนการบิด	83
7.4 อิทธิพลของอัตราส่วนความกว้าง	84
7.5 อิทธิพลของอัตราส่วนความยาว	84
7.6 อิทธิพลของแผ่นบิดคู่	84
บรรณานุกรม	85

ภาคผนวก  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ของอนุภาคของไหลทั้ง 3 ทิศทาง	17
3.2 ค่า $D$ $Nu$ และ $f$ สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อพื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ กัน	31
5.1 ตารางกริดอิสระ	44
ก.1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) แผ่นบิตทั่วไป (ข) แผ่นบิตแบบ Regularly spaced elements ของ Pongjet Promvonge et al. (2006)	6
2.2 แผ่นบิตแบบมีหยักของ Smith Eiamsa-ard (2010)	7
2.3 แผ่นบิตคู่ในท่อกลมของ Pongjet Promvonge et al. (2012)	7
2.4 แผ่นบิตเกลียวเจาะรู ของ K. Nanan (2014)	9
2.5 แหวนกรวยแบบต่างๆ ของ Pongjet Promvonge, Smith Eiamsa-ard (2006)	9
2.6 ขดลวด (Wire Coil) จาก SMITH EIAMSA-ARD et al. (2011)	9
3.1 ชิ้นส่วนของของไหลสำหรับกฎการอนุรักษ์	12
3.2 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนของไหล	14
3.3 องค์ประกอบของความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนของไหล	18
3.4 องค์ประกอบของความเค้นในทิศทาง $x$	18
3.5 การก่อตัวของบาวนด์ดาเลียเรเยอร์ของการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม	20
3.6 สมดุลแรงบนอิลิเมนต์ $dx$ สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ก่อตัวเต็มที่ในท่อกลม	22
3.7 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม	25
3.8 การก่อตัวของบาวนด์ดาเลียเรเยอร์ทางความร้อนในท่อกลม	25
3.9 การเปลี่ยนแปลง $h$ ตามแนวแกน สำหรับการไหลภายในท่อ	28
5.1 Vortex Generator	37
5.2 กรณีศึกษาพื้นฐานแผ่นบิตเจาะรู	40
5.3 แผ่นบิตที่เจาะรูในกรณีอัตราส่วนการบิต	40
5.4 แผ่นบิตที่เจาะรูในกรณีอัตราส่วนความยาว	41
5.5 แผ่นบิตที่เจาะรูโดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความกว้าง	41
5.6 การเปรียบเทียบค่า $Nu$ ของท่อกลมผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับผลที่ได้จากการจำลอง	43
5.7 การเปรียบเทียบค่าตัว $f$ ของท่อกลมผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับค่าที่ได้จากการจำลอง	43
5.8 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของค่า $Nu/Nu_0$	44
5.9 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของค่าตัวประกอบความเสียดทาน	44
6.1 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล กรณีศึกษาพื้นฐาน	47
6.2 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหล กรณีศึกษาพื้นฐาน (Basic Case)	48
6.3 การกระจาย $Nu$ บนระนาบขวางการไหล กรณีศึกษาพื้นฐาน (Basic Case)	49
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Nu_0$ กับ $Re$ กรณีการติดตั้งแผ่นบิตเจาะรู	49
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $f/f_0$ กับ $Re$ กรณีแผ่นบิตเจาะรู	50
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $TEF$ กับ $Re$ กรณีศึกษาพื้นฐาน (Basic Case)	50

6.7 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $TR = 2$	51
6.8 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $TR = 2$	52
6.9 การกระจาย $Nu$ บนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $TR = 2$	53
6.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Nu_0$ กับ $Re$ กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $TR$ ต่างๆ	53
6.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $f/f_0$ กับ $Re$ กรณีแผ่นบิตเจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $TR$ ต่างๆ	54
6.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $TEF$ กับ $Re$ กรณีแผ่นบิตเจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $TR$ ต่างๆ	54
6.13 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่ $LR = 11.14$	56
6.14 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิตเจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $LR = 11.14$	57
6.15 การกระจาย $Nu$ บนระนาบขวางการไหล กรณี $LR = 11.14$	57
6.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Nu_0$ กับ $Re$ กรณีการติดตั้งแผ่นบิตเจาะรูที่ $LR$ ต่างๆ	58
6.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง $f/f_0$ กับ $Re$ กรณีแผ่นบิตเจาะรูที่ $LR$ ต่างๆ	59
6.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง $TEF$ กับ $Re$ กรณีแผ่นบิตเจาะรูที่ $LR$ ต่างๆ	59
6.19 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $WR = 5.71$	59
6.20 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิตเจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $WR = 5.71$	60
6.21 การกระจาย $Nu$ บนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $WR = 5.71$	61
6.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Nu_0$ กับ $Re$ กรณีแผ่นบิตเจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $WR$ ต่างๆ	62
6.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง $f/f_0$ กับ $Re$ กรณีแผ่นบิตเจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $WR$ ต่างๆ	62
6.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง $TEF$ กับ $Re$ กรณีแผ่นบิตเจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $WR$ ต่างๆ	63
6.25 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหลที่ $Re = 3000$ กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่ $TR$ ต่างๆ	64
6.26 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหลที่ $Re = 3000$ กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่ $TR$ ต่างๆ	65
6.27 การกระจาย $Nu$ บนระนาบขวางการไหลที่ $Re = 3000$ กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่ $TR$ ต่างๆ	66
6.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Nu_0$ กับ $Re$ กรณีการติดตั้งแผ่นบิตเจาะรูที่ $TR$ ต่างๆ	66
6.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง $f/f_0$ กับ $Re$ กรณีการติดตั้งแผ่นบิตเจาะรูที่ $TR$ ต่างๆ	67
6.30 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหลที่ $Re = 3000$ กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่ $WR$ ต่างๆ	68
6.31 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิตเจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $Re = 3000$ ที่ $WR$ ต่างๆ	69
6.32 การกระจาย $Nu$ บนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิตเจาะรูสี่เหลี่ยมที่ $Re = 3000$ ที่ $WR$ ต่างๆ	70
6.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Nu_0$ กับ $Re$ กรณีการติดตั้งแผ่นบิตเจาะรูที่ $WR$ ต่างๆ	70
6.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง $f/f_0$ กับ $Re$ กรณีแผ่นบิตเจาะรูที่ $WR$ ต่างๆ	71
6.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง $TEF$ กับ $Re$ กรณีแผ่นบิตเจาะรูที่ $WR$ ต่างๆ	71
6.36 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหลที่ $Re = 3000$ กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่ $LR$ ต่างๆ	73
6.37 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหลที่ $Re = 3000$ กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่ $LR$ ต่างๆ	74
6.38 การกระจาย $Nu$ บนระนาบขวางการไหลที่ $Re = 3000$ กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่ $LR$ ต่างๆ	74
6.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Nu_0$ กับ $Re$ กรณีการติดตั้งแผ่นบิตเจาะรูที่ $LR$ ต่างๆ	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทางสำนักพิมพ์ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และขอสงวนลิขสิทธิ์ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.38 การกระจาย  $Nu$  บนระนาบขวางการไหลที่  $Re = 3000$  กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่  $LR$  ต่างๆ 74

6.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu/Nu_0$  กับ  $Re$  กรณีการติดตั้งแผ่นบิตเจาะรูที่  $LR$  ต่างๆ 75

6.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง $f/f_0$ กับ $Re$ กรณีแผ่นปิดเจาะรูที่ $LR$ ต่างๆ	75
6.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง $TEF$ กับ $Re$ กรณีแผ่นปิดเจาะรูที่ $LR$ ต่างๆ	76
6.42 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล กรณีแผ่นปิดคู่ที่เจาะรู (Duo Basic Case)	77
6.43 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นปิดคู่ที่เจาะรู (Duo Basic Case)	78
6.44 การกระจาย $Nu$ บนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นปิดคู่ที่เจาะรู (Duo Basic Case)	79
6.45 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu/Nu_0$ กับ $Re$ กรณีติดตั้งแผ่นปิดคู่ (Duo Basic Case)	80
6.46 ความสัมพันธ์ระหว่าง $f/f_0$ กับ $Re$ กรณีติดตั้งแผ่นปิดคู่ (Duo Basic Case)	81
6.47 ความสัมพันธ์ระหว่าง $TEF$ กับ $Re$ กรณีติดตั้งแผ่นปิดคู่ (Duo Basic Case)	82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคปัจจุบันพลังงานถือเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ บวกกับการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก ทำให้ความต้องการด้านพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นไม่สอดคล้องกับทรัพยากรที่ใช้ในการผลิตพลังงาน เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ที่มีปริมาณน้อยลง นอกจากนี้จะใช้วิธีการหาพลังงานทดแทนแล้ว ก่อนอื่นเราควรหาวิธีใช้พลังงานที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเสียก่อน ในอุตสาหกรรมทุกขนาด การพัฒนาระบบการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะในโรงงานอุตสาหกรรมที่สามารถใช้อุปกรณ์ดังกล่าวได้อย่างเต็มความสามารถจะช่วยลดต้นทุนการผลิตได้เป็นอย่างมากโดยที่คุณภาพของงานไม่ได้ด้อยลง สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายประเภท ซึ่งสามารถพบได้โดยทั่วไปในเชิงวิศวกรรมตัวอย่างเช่น หม้อน้ำรถยนต์ คอนเดนเซอร์เครื่องปรับอากาศ ระบบพาสเจอร์ไรส์ ฯลฯ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปส่วนใหญ่ใช้หลักการพาโดยการเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น โดยการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการติดตั้งที่พื้นผิว การใช้เจ็ทหมุนควงของไหลให้พุ่งชนพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน การติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วน เป็นต้น

โดยทั่วไปวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการพา แบ่งออกเป็นสองกลุ่มซึ่งประกอบด้วย

1) Passive technique เป็นวิธีที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกในการช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

2) Active technique เป็นวิธีที่ต้องการพลังงานจากภายนอกเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

สำหรับวิธี Passive technique นั้นเป็นที่นิยมใช้กันอย่างมากในทางอุตสาหกรรม โดยอาศัยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวที่มีการเพิ่มขึ้นงานเข้าไปหรือมีการปรับปรุงพื้นผิวในรูปแบบต่างๆ เช่น ติดตั้งแผ่นกั้น (baffle) ใช้ครีบริบรูปทรงต่างๆ (ribs) ใช้ปีกเล็ก (winglet) หรือใช้แผ่นบิด (Twisted tape) เป็นต้น สำหรับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการเพิ่มขึ้นงานดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนและเป็นตัวสร้างการไหลให้มีลักษณะแบบปั่นป่วน แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นงานหรือการปรับปรุงพื้นผิวนั้นยังมีส่วนเพิ่มค่าความดันตกคร่อมให้กับระบบอีกด้วย ซึ่งจะเกี่ยวเนื่องกับการสูญเสียพลังงานมากขึ้น ดังนั้นในการสร้างหรือผลิตอุปกรณ์สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงประโยชน์ในเชิงเศรษฐศาสตร์ด้วย

แผ่นบิด (Twisted tape) เป็นอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากการติดตั้งและการดูแลรักษาสามารถทำได้ง่าย รวมทั้งยังสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนได้ดี เนื่องจากความนิยมในการใช้แผ่นบิดในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนส่งผลให้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยแผ่นบิดเป็นจำนวนมาก

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาศึกษาปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนดังกล่าว วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนี้มีข้อดีอยู่หลายประการ ได้แก่ สามารถเห็นกลไกที่ซับซ้อนของการไหลซึ่งทำให้เข้าใจพฤติกรรมของของไหลได้ดีขึ้น นอกจากนี้ในการทดลองยังมีข้อจำกัดของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง หากค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษามีมากมายหลายค่าซึ่งถ้ามีความจำเป็นต้องศึกษาให้ครอบคลุมรอบด้านด้วยแล้ว การใช้วิธีการทดลองจากชุดอุปกรณ์จริงจะส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองทั้งระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ค่าอุปกรณ์ ค่าวัสดุ และค่าเครื่องมือวัดต่างๆ ซึ่งถ้าหากต้องการความละเอียดมาก เครื่องมือที่ใช้ก็อาจมีราคาแพง และรวมทั้งมีการสิ้นเปลืองพลังงานและแรงงานที่ใช้ในการทดลองอีกด้วย ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาศึกษาปัญหาการไหลดังกล่าวก็จะเป็นการช่วยแก้ปัญหาที่เกิดจากการทดลองได้ดี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมการไหลที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่มีการเพิ่มแผ่นบิดที่เจาะรูสี่เหลี่ยมในลักษณะต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การไหลและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และนอกจากการศึกษานี้จะทำให้เข้าใจถึงกลไกของการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นแล้วยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมอื่นๆ ได้อีกด้วย สำหรับงานวิจัยนี้มี วัตถุประสงค์หลักประกอบด้วย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนค่าความดันตกคร่อมและพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในท่อกลมในกรณีติดตั้งแผ่นบิดที่เจาะรูสี่เหลี่ยมโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของแผ่นบิดในลักษณะต่าง ๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหล, การถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของการไหลภายในท่อกลม ในกรณีที่ทำการติดตั้งแผ่นบิดที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ), อิทธิพลของอัตราส่วนการบิด (Twisted Ratio,  $TR$ ), อิทธิพลของอัตราส่วนความยาว (Length Ratio,  $LR$ ), อิทธิพลของส่วนความกว้าง (Width Ratio,  $WR$ ),

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method)
- 1.3.2 ทำการคำนวณในแบบจำลองการไหล 3 มิติ ที่มีการไหลแบบปั่นป่วน เป็นการไหลแบบคงตัวและไม่อัดตัว ในช่วงเลขเรย์โนลด์ ตั้งแต่ 3000 ถึง 20,000 และมีอากาศเป็นของไหลสำหรับการทดสอบ
- 1.3.3 พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection)
- 1.3.4 การคู่ควบของความเร็วและความดันใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE
- 1.3.5 ทำการวิจัยเฉพาะท่อกลมที่สภาวะอุณหภูมิผิวคงที่เท่ากับ 310 K
- 1.3.7 แผ่นบิตถูกติดตั้งแบบสอดใส่ในท่อกลม ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการบิด การเปลี่ยนแปลงขนาดของรู ทั้งความกว้างและความยาว เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดสำหรับแผ่นบิตเจาะรูสี่เหลี่ยม
- 1.3.8 หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อซึ่งนำไปสู่การใช้งานจริง

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 รวบรวมข้อมูล ทำการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลผ่านครีบริบบแบบต่างๆ ภายในท่อกลม
- 1.4.2 กำหนดลักษณะของปัญหา, ลักษณะรูปร่างของแผ่นบิตที่เจาะรูสี่เหลี่ยมและสร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลพร้อมกับเลือกขนาดและจำนวนกริดที่เหมาะสม
- 1.4.3 ตรวจสอบโปรแกรมกับผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ทำการคำนวณเชิงตัวเลขในปัญหาที่ต้องการศึกษา
- 1.4.4 ทำการคำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการไหลสามมิติที่ต้องการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามที่ระบุในวัตถุประสงค์ได้แก่  $Re$  (Reynold Number),  $TR$  (Twisted Ratio),  $LR$  (Length Ratio),  $WR$  (Width Ratio)
- 1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณ นำข้อมูลจากการคำนวณมาทำการวิเคราะห์ผลและแสดงค่าในรูปพารามิเตอร์ไร้หน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มิได้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4.6 สรุปผลการวิจัย

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่ทำการติดตั้งแผ่นบิตเจาะรู
- 1.5.2 เพื่อการพัฒนาและออกแบบแผ่นบิตที่เจาะรูสี่เหลี่ยมภายในท่อกลมให้เกิดประสิทธิภาพและมีความเหมาะสม ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการประยุกต์ใช้งานในภาคการเกษตรกรรมต่อไป
- 1.5.3 เป็นวิธีที่ช่วยประหยัดพลังงานและลดการใช้วัสดุในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรม

### 1.6 เค้าโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท โดยที่ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงที่มาของงานวิจัย รวมถึงความสำคัญ วัตถุประสงค์ และขอบเขตของงานวิจัย บทที่ 2 กล่าวถึงวรรณกรรมปริทรรศน์ นำเสนอเกี่ยวกับผลงานวิจัยที่ได้มีการศึกษาและเผยแพร่มาแล้ว ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธี passive technique เช่น แผ่นบิตที่เจาะรูในรูปแบบต่าง ๆ บทที่ 3 และ 4 ได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลขและพลศาสตร์การไหล ต่อมาในบทที่ 5 นำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ศึกษาและนำเสนอกรณีศึกษาสำหรับแผ่นบิตจากผลจากการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนำเสนอในบทที่ 6 โดยนำเสนอโครงสร้างการไหลและพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนรวมถึงความดันตกคร่อมซึ่งแสดงในรูปของการกระจายตัวของเลขนัสเซล, ค่าความดันตกคร่อมและเส้นกระแสการไหลในรูปแบบต่าง ๆ ของแผ่นบิตที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่มีเงื่อนไขตามกรณีที่ทำการศึกษาและท้ายที่สุดในบทที่ 7 จะทำการสรุปผลการศึกษา ซึ่งจะกล่าวสรุปถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการศึกษากการสำหรับนำไปใช้กับงานทางอุตสาหกรรมและงานวิจัยอื่นในอนาคตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

## วรรณกรรมปริทรรศน์

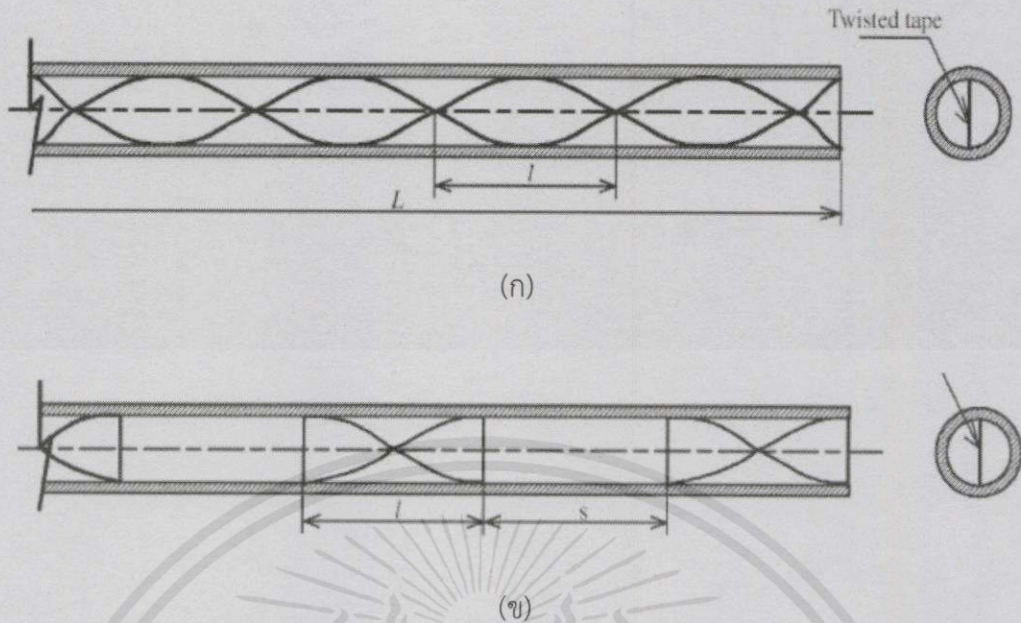
สืบจากเนื้อหาที่ผ่านมาจากบทนำได้เข้าสู่เนื้อหาที่ได้พูดกล่าวถึงงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนจากการเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมที่เพิ่มจากการใช้ตัวเพิ่มการปั่นป่วน หรือ (Turbulator) ที่มีรูปแบบต่างๆ มากมายและมีวิธีการใช้งานร่วมของตัวเพิ่มการปั่นป่วนในท่อกลมเพื่อให้มีการไหลแบบปั่นป่วนที่มากขึ้น, มีปัจจัยจากแรงเสียดทานที่น้อย, ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นกว่า ซึ่งในช่วงเวลาที่ผ่านมา ได้มีการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง และมีการคำนวณในเชิงตัวเลข หรือมีการทั้งวิธีร่วมกัน โดยในที่นี้จะเน้นศึกษา งานวิจัยที่มีตัวเพิ่มการปั่นป่วนในในรูปแบบต่างๆ ลักษณะการทำงาน ลักษณะการไหล การถ่ายเทความร้อน ความเสียดทาน ประสิทธิภาพ มาคิดค้นตัวเพิ่มการปั่นป่วนในแบบใหม่ หรือ มีการเพิ่มปรับเปลี่ยนไป เพื่อเป็นแนวทางการคิดที่จะนำไปวิเคราะห์คิดค้นพัฒนา ตัวเพิ่มการปั่นป่วนในต่อไป

### 2.1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แผ่นบิด (Twisted Tape)

Naphon (2005) ได้ทำการศึกษาลักษณะของการถ่ายเทความร้อนและความดันตกในท่อกลมที่ใส่และไมใส่แผ่นบิดจากผลการทดลองพบว่า จากระยะพิตซ์ของแผ่นบิดที่มีความเหมาะสมทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ก็ทำให้ความดันตกคร่อมภายในท่อเพิ่มขึ้นไปด้วยเช่นกัน

Promvonge et al. (2006) ได้ทำการศึกษา เป็นการทดลองที่ทดสอบการถ่ายเทความร้อนผ่าน Turbulator ประเภทแผ่นบิดและแผ่นบิดแบบ Regularly spaced elements โดยคิดจากอัตราส่วนการบิด ( $y/w$ ) เมื่อเทียบกับสภาวะการไหลในท่อปกติ พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อัตราส่วนการบิดที่ต่ำนั้นสูงกว่า ที่อัตราส่วนการบิดสูง ส่วนปัจจัยของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการไหลจะพบว่าในท่อที่มีแผ่นบิดจะมีแรงเสียดทานมากกว่าในท่อที่ไม่มีแผ่นบิด และพบว่าในอัตราส่วนการบิดที่ต่ำจะมีแรงเสียดทานที่มากเพราะเกิดจากการไหลวนที่เพิ่มขึ้นจากระยะพิตซ์ที่สั้นกว่า ผลกระทบที่เกิดจากการใช้แผ่นบิดแบบ Regularly spaced elements ในส่วนที่มีอัตราส่วนช่องว่างต่ำจะมีการถ่ายเทความร้อนมากกว่า ในส่วนที่มีอัตราส่วนช่องว่างสูง และจะมีแรงเสียดทานที่มากกว่าเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

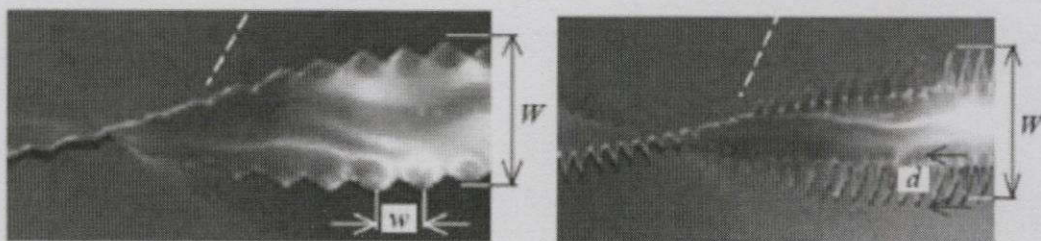


รูปที่ 2.1 (ก) แผ่นบิดทั่วไป (ข) แผ่นบิดแบบ Regularly spaced elements ของ Promvonge et al. (2006)

Krishna et al. (2008) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทดลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยใช้แผ่นบิดแบบ Straight Full Twist ใส่เข้าไปในท่อ โดยใช้อัตราส่วนการบิดที่แตกต่างกันออกไป และระยะห่างของช่องว่างที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า ระยะของช่องว่างเป็น 2 นิ้ว จะไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนแต่อย่างใด แต่สำหรับระยะของ ช่องว่างจะทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนได้ดีและจะเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนได้ดีขึ้นระยะค่า  $Nu$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการลดระยะของช่องว่าง เมื่อลดลงจนต่ำกว่า 2 นิ้ว พบว่าค่าเลขนัสเซลไม่มีการเพิ่มขึ้นอีกซึ่งหมายความว่าค่าเลขนัสเซลมีค่ามากที่สุดที่ระยะช่องว่างเท่ากับ 2 นิ้ว

Rahimi et al. (2009) ศึกษาพฤติกรรมของของไหลโดยการใส่แผ่นบิดธรรมดาและแผ่นบิดดัดแปลงอีก 3 แบบ คือ แผ่นบิดที่ขรุขระ, แผ่นบิดที่เจาะรู, แผ่นบิดที่มีรอบบากโดยศึกษาเปรียบเทียบกันและศึกษาความปั่นป่วนของของไหลจากค่าความเร็วเป็นหลักจากผลการศึกษาพบว่าหากมีค่าความเร็วมากความปั่นป่วนในการไหลยังมีมากขึ้นซึ่งส่งผลต่อค่าเลขนัสเซล, ความเสียดทาน, สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและพบว่าแผ่นบิดที่เจาะรูมีความเสียดทานน้อยที่สุดในแผ่นบิดดัดแปลงโดยในการศึกษาที่ใช้ทั้งแบบการทดลองและแบบจำลองเชิงตัวเลข

Eiamsa-ard (2010) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ ผลกระทบจากการใช้แผ่นบิดที่มีลักษณะเป็นรอยหยัก จะทำให้ความหนาแน่นของการไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้นและลดชั้นขอบเขตความร้อนส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น และในส่วนของงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานของท่อที่ใส่และไม่ใส่แผ่นบิดและแผ่นบิดแบบมีหยัก ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



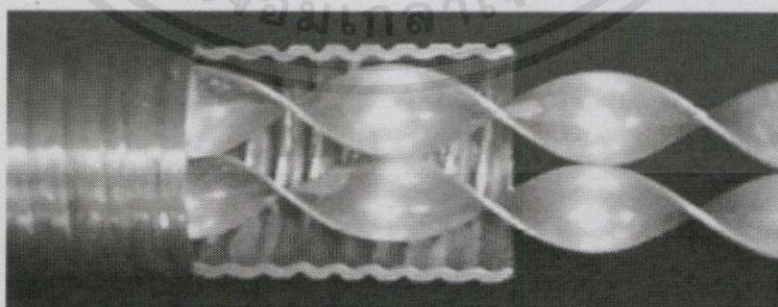
รูปที่ 2.2 แผ่นบิดแบบมีหยักของ Eiamsa-ard (2010)

Murugesan et al. (2010) ได้ทำการทดลองที่เกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบของการใช้แผ่นบิด ในลักษณะรอยตัดรูปวีต่างๆ ทั้ง 3 แบบ และเทียบกับแผ่นบิดธรรมดา การถ่ายเทความร้อนแรงเสียดทานและปัจจัยสมรรถนะทางความร้อน ได้ผลเห็นชัดว่ารอยตัดรูปตัววีจะทำให้การถ่ายเทความร้อน ปัจจัยจากแรงเสียดทาน และสมรรถนะทางความร้อนสูงขึ้น เมื่อเทียบกับแผ่นบิดธรรมดา

Thianpong et al. (2011) ได้ทำการทดลองที่เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ Turbulator ประเภทแผ่นบิดแบบธรรมดา และ แผ่นบิดที่มีลักษณะแผ่นบิดที่การทำตัวปีกด้านข้างและมีการเจาะรูตอนกลางนำมาทดลองเปรียบเทียบกับท่อเปล่า ๆ พบว่าตัวปีกทำให้เกิดความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น ไกลผนังท่อได้และทำให้การถ่ายความร้อนเพิ่มขึ้นและการเจาะรูจะทำความเสียดทานลดลง

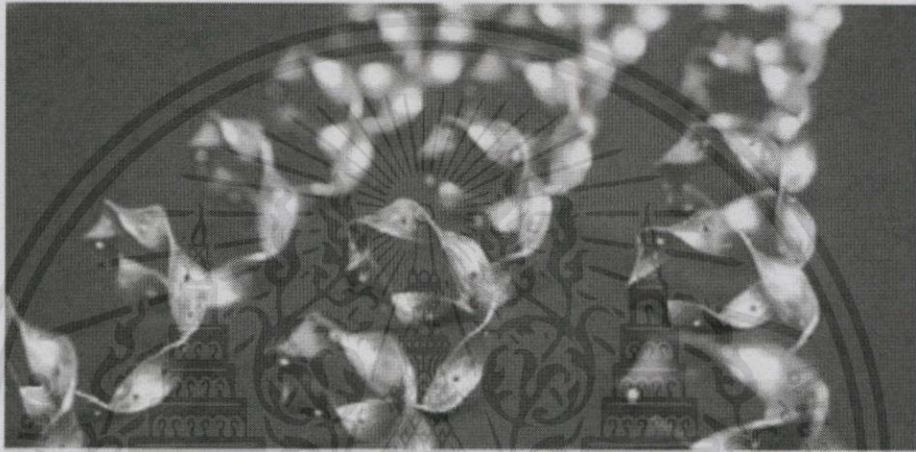
Bas, Ozceyhan (2012) ได้คิดการทดลองจากการศึกษาวิจัยแผ่นบิดที่หลากหลาย งานวิจัยนี้ สร้างรูปแบบใหม่ โดยการติดตั้งแผ่นบิดให้มีระยะห่างจากผนังของท่อ และศึกษาผลของระยะห่าง และอัตราส่วนการบิดต่อการถ่ายเทความร้อน

Promvong et al. (2012) ได้ใช้ turbulators เป็นที่นิยม จึงศึกษาโดยใช้ท่อที่เป็นลูกคลื่น (Co – Swirl) และมีแผ่นบิด 2 อัน โดยคาดหวังว่าแผ่นบิดทั้งคู่จะช่วยให้การผสมของของไหลระหว่าง ตรงกลางของท่อกับผนังได้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.3 แผ่นบิดคู่ในท่อกลมของ Promvong et al. (2012)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

Nanan (2013) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการบิดงอของแผ่นบิตเกลียวสองแบบ คือ แบบที่ให้ไหลตัดกัน (C-HIT) กับแบบไหลไปด้วยกัน (Co-HTT) ศึกษาที่  $Re = 6,000 - 20,000$  ซึ่งจากผลพบว่าแบบ C-HTT จะให้ค่าเลขนัสเซลและความเสียดทานมากกว่า แต่จะให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าแบบ Co-HTT และเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนค่าพิตซ์พบว่าหากมีค่าน้อยจะให้ค่าเลขนัสเซลและความเสียดทานมากขึ้น แต่จะได้สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนน้อยลง



รูปที่ 2.4 แผ่นบิตเกลียวเจาะรู ของ. Nanan (2014)

Nanan (2014) ได้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้มากยิ่งขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเช่นกัน แผ่นบิตเกลียวเจาะรูถึงจะทำให้้อตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นน้อย แต่สามารถลดความต้านทานได้ดี ในส่วนของงานวิจัยนี้จะทดสอบผลของแผ่นบิตเกลียวเจาะรูที่มีการเจาะรูเพิ่มขึ้นต่อการถ่ายเทความร้อน

## 2.2 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยใช้แหวนกรวย (Conical Ring)

Promvonge, Eiamsa-ard (2006) เป็นการศึกษาอิทธิพลของ ตัวเพิ่มการปั่นป่วนการไหล ที่เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทาน ในท่อกลม จะทดลองโดยใช้ Turbulator 2 แบบแหวนกรวยแบบลู่ออกและแหวนกรวยแบบลู่อเข้า (Divergent -nozzle Turbulator, Convergent-nozzle Turbulator) ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองพบว่า D - nozzle สามารถทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนหรือไหลย้อนกลับได้ดีกว่า C - nozzle จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานมากกว่า C - nozzle



เนื่องจากความเป็นที่นิยมใช้งานของแผ่นบิตและจากการศึกษาการใช้ Turbulators จากผลงานการวิจัยในอดีตพบว่าแผ่นบิตช่วยในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าขดลวด (Wire Coil) และแหวนกรวย (Conical ring) และมีความเสียดทานน้อยที่สุดในจำพวกแผ่นบิตดัดแปลง ผู้จัดทำจึงเลือกปรับปรุงลักษณะของแผ่นบิตโดยทำการเจาะรูเป็นรูสี่เหลี่ยมโดยคาดหวังว่าแผ่นบิตนี้จะสามารถลดความดันตกคร่อมโดยค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงมากนักซึ่งจะช่วยลดกำลังจากปั๊มได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของของไหลและการถ่ายเทความร้อน เพื่อวิเคราะห์ปัญหาของการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมหรือไฟไนต์วอลุ่ม โดยสมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนประกอบด้วย กฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนของของไหลและสมรรถนะเชิงความร้อน (thermal performance)

### 3.1 สมการควบคุมของการไหลและการถ่ายเทความร้อน

สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่มีการติดตั้งครีบบนพื้นผิวให้ความร้อนในท่อกลม มีสมมติฐานของการไหลดังนี้

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

สมการควบคุมการไหลประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง, สมการโมเมนตัม (หรือเรียกว่าสมการ นา-เวียร์สโตกส์) และสมการพลังงาน เมื่อพิจารณาภายใต้สมมติฐานข้างต้น สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

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

สมการโมเมนตัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้

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

## สมการพลังงาน

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

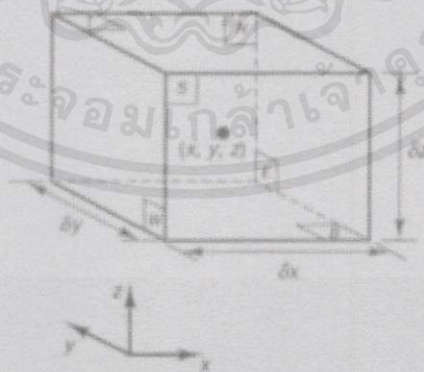
เมื่อ  $\Gamma$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่เชิงความร้อน ซึ่งกำหนดโดย  $\Gamma = \mu/Pr$

โดยที่การไหลสามารถอธิบายด้วยกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ ดังนี้

- มวลของไหลไม่สูญหายไปไหน
- อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล (กฎข้อที่สองของนิวตัน)
- อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนกับ อัตราของงานที่กระทำในอนุภาคของไหล (กฎข้อหนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์)

ของไหลจะถูกพิจารณาว่ามีความต่อเนื่องสำหรับการวิเคราะห์การไหลของของไหลที่ระดับมหภาค คือ พิจารณาที่ขนาดระดับ  $1 \mu\text{m}$  ขึ้นไป โครงสร้างและการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุลสามารถไม่นำมาพิจารณาได้ เราสนใจที่จะอธิบายพฤติกรรมของไหลในเทอมของคุณสมบัติในระดับมหภาค เช่น ความเร็ว ความดัน ความหนาแน่น อุณหภูมิ รวมทั้งอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเหล่านี้ เป็นต้น สิ่งนี้อาจจะคิดเป็นค่าเฉลี่ยของกลุ่มโมเลกุลจำนวนมาก ดังนั้นจุดใดๆ ใน ของไหลนั้นจะมีคุณสมบัติของของไหลในระดับมหภาค ไม่ขึ้นกับอิทธิพลจากอนุภาคในระดับโมเลกุล

เราพิจารณาชิ้นส่วนของไหลขนาดเล็กที่มีความยาวด้านเท่ากับ  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชิ้นส่วนของของไหลสำหรับกฎการอนุรักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวหน้าทั้งหกด้านจะถูกแทนด้วย N, S, E, W, T, B ซึ่งแทนถึงทิศทางในแนว เหนือ ได้ ตะวันออก ตะวันตก บน และล่าง ตามลำดับ ศูนย์กลางของชิ้นส่วนอยู่ที่ตำแหน่ง  $(x, y, z)$  เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นระบบของ มวล โมเมนตัม และพลังงานของชิ้นส่วนของไหล จะสามารถสร้างสมการการไหลของของไหลได้ คุณสมบัติของของไหลทั้งหมดจะเป็นฟังก์ชันของ ตำแหน่งและเวลา ดังนั้นเราจำเป็นต้อง เขียน  $\rho(x, y, z, t)$ ,  $p(x, y, z, t)$ ,  $T(x, y, z, t)$  และ  $u(x, y, z, t)$  สำหรับความหนาแน่น, ความดัน, อุณหภูมิและเวกเตอร์ความเร็ว ตามลำดับ เพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนในการเขียนค่าสัญลักษณ์ แสดงคุณสมบัติดังกล่าว เราจะไม่ระบุตำแหน่งและ เวลา เช่น ความดันที่ศูนย์กลาง  $(x, y, z)$  ของชิ้นส่วนของไหลที่เวลา  $t$  จะถูกแทนโดย  $p$  หรือการเปลี่ยนแปลงในทิศทาง  $x$  ของความดันที่ศูนย์กลาง  $(x, y, z)$  ที่เวลา  $t$  หนึ่งๆ จะถูกแทนโดย  $\partial p / \partial x$  หลักการนี้จะถูกนำไปใช้ในสำหรับคุณสมบัติของไหลทั้งหมด

ชิ้นส่วนของไหลที่พิจารณานั้นมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งคุณสมบัติของไหลที่ผิวหน้าสามารถ อธิบายได้อย่างแม่นยำด้วยสองพจน์แรกของสมการ Taylor ดังนั้น สำหรับตัวอย่างความดันที่ผิวหน้า W และ E ซึ่งทั้งคู่มีระยะห่างจากศูนย์กลางของชิ้นส่วนของไหลเท่ากับ  $1/2 \cdot \delta_x$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$p - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \delta_x \text{ และ } p + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \delta_x$$

### 3.1.1 การอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ

ขั้นตอนแรกของการหาสมการอนุรักษ์มวล คือ การพิจารณาถึงสมดุลมวลของชิ้นส่วนของไหล ดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนของไหล = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนย่อยของของไหล คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (3.4)$$

อัตราการไหลเชิงมวลผ่านพื้นผิวและชิ้นส่วนย่อย ซึ่งนิยามโดยผลคูณของความหนาแน่น พื้นที่ผิว และความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น จากรูปที่ 3.2 จะพบว่าการไหลสุทธิของมวลเข้าสู่ชิ้นส่วนย่อยผ่านพื้นผิวสามารถเขียนได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ เอ็นจินีเอริงส์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทางสน อภททท ทมมให้คิดแบบลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& (\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x) \delta y \delta z - (\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x) \delta y \delta z \\
& + (\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y) \delta x \delta z - (\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y) \delta x \delta z \\
& + (\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z) \delta x \delta y - (\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z) \delta x \delta y \\
& - (\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z) \delta x \delta y
\end{aligned} \tag{3.5}$$

โดยการไหลเข้าสู่ชิ้นส่วนที่ทำให้มวลของชิ้นส่วนย่อยเพิ่มขึ้นถูกกำหนดให้เป็นบวก และมีค่าเป็นลบเมื่อมีการไหลออกจากชิ้นส่วนย่อย



รูปที่ 3.2 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนของไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในชิ้นส่วนย่อยนั้นเท่ากับอัตราของมวลสุทธิจากการไหลออกผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนย่อย ซึ่งเมื่อย้ายข้างให้อยู่ในฝั่งเดียวกันเมื่อรวมกันแล้วจะหักล้างกันหมด เทอมทั้งหมดได้ถูกเรียบเรียงทางซ้ายของสมการและถูกหารด้วยปริมาตรของชิ้นส่วนย่อย  $\delta x \delta y \delta z$  ซึ่งจะได้

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

หรือในรูปแบบของเวกเตอร์

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{3.7}$$

สมการ (3.7) นี้ คือ สมการอนุรักษ์มวล หรือสมการความต่อเนื่อง 3 มิติ แบบการไหลไม่คงตัว และอัดตัวได้ เทอมแรกทางซ้ายมือ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น (มวลต่อปริมาตร) ต่อเวลา เทอมที่สองอธิบายถึงการไหลสุทธิของมวลข้ามผ่านขอบเขตของปริมาตรเล็ก ๆ นั้น เรียกว่า เทอม

ของการพา สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (เช่น ของเหลว) ความหนาแน่นมีค่าคงที่และสมการ (3.7) จะ กลายเป็น

$$\operatorname{div}(u) = 0 \quad (3.8)$$

หรือในรูปแบบเต็ม

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.9)$$

### 3.1.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอนุภาคของไหล ในเทอมชิ้นส่วนย่อยของไหล

ในกฎของการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานนั้น จะมีการกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอนุภาคของไหล คุณสมบัติแต่ละอย่างของอนุภาคจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง  $(x, y, z)$  ของ อนุภาค และเวลา  $(t)$  ในการศึกษาที่เรากำหนดให้ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อหน่วยมวล ด้วยสัญลักษณ์  $\phi$  โดยการเปลี่ยนแปลงของ  $\phi$  เทียบกับเวลาของอนุภาคของไหล  $D\phi/Dt$  คือ

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{dz}{dt}$$

และโดยที่  $dx/dt = u$ ,  $dy/dt = v$  และ  $dz/dt = w$  หากแทนค่าดังกล่าวไปในสมการข้างบน จะได้ว่า

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} + w \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \operatorname{grad} \phi \quad (3.10)$$

$D\phi/Dt$  เป็นนิยามของอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ  $\phi$  ต่อหน่วยมวล ในกรณีของสมการอนุรักษ์มวล เราสนใจที่จะพัฒนาสมการสำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยปริมาตร อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ  $\phi$  สามารถถูกแปลงให้เป็นคุณสมบัติเชิงปริมาตรได้โดยการคูณความหนาแน่น  $\rho$  เข้าไปกับเทอม  $D\phi/Dt$  ดังนั้น

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \rho \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \operatorname{grad} \phi \right) \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไปอนญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปแบบนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการอธิบายความเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของของไหล  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้จัดทำไม่รับผิดชอบต่อผล และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ในปริมาตรเล็กๆ ที่หยุดนิ่งหนึ่งๆ เป็นการนิยามความสัมพันธ์ระหว่าง 1) อนุพันธ์ของ คุณสมบัติ  $\phi$   
ของอนุภาคของไหล กับ 2) อัตราเปลี่ยนแปลงของ  $\phi$  ในชิ้นส่วน หรือปริมาตรย่อยๆ ของของไหลนั้น

ต่อไปนี้หากเราพิจารณากฎการอนุรักษ์มวล ค่าของมวลต่อหน่วยปริมาตร (ในที่นี้ คือ ความหนาแน่น  $\rho$ ) คือ พารามิเตอร์ที่เรากำลังศึกษา เมื่อพิจารณาผลรวมของ: 1) อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นในปริมาตรเล็กๆ และ 2) ผลของการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการพาในสมการอนุรักษ์มวล (3.7) ก็คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u)$$

ดังนั้นรูปทั่วไปของ เทอมทั้งสองเทอมนี้ สำหรับคุณสมบัติใดๆ ของของไหล  $\phi$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi u) \quad (3.12)$$

สมการที่ (3.12) เทอมแรก คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ  $\phi$  ต่อหน่วยปริมาตรบวกกับเทอมที่สอง คือ การไหลสุทธิของ  $\phi$  ต่อปริมาตรที่ออกจากชิ้นส่วนย่อยของไหล ซึ่งเราสามารถนำมาเขียนใหม่เพื่อให้ได้ภาพความสัมพันธ์ ระหว่างผลรวมของทั้งสองเทอมนี้กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $\phi$  ในอนุภาคของไหล ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi u) = \rho \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \text{grad} \phi \right) + \phi \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) \right) = \rho \frac{D\phi}{Dt} \quad (3.13)$$

เทอม  $\phi \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) \right)$  เท่ากับศูนย์เนื่องจากสมการอนุรักษ์มวล (3.7) จากความสัมพันธ์ ดังแสดงใน (3.13) จะได้ว่า

อัตราการเพิ่มของ  $\phi$  สำหรับชิ้นส่วนย่อยของไหล + อัตราการไหลสุทธิของ  $\phi$  ที่ออกจากชิ้นส่วนย่อยของไหล = อัตราการเพิ่มของ  $\phi$  สำหรับอนุภาคของไหล

การเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของอนุภาคของไหลทั้ง 3 ทิศทาง อ้างอิงแกนในพิกัดฉาก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานซึ่งเป็นปริมาณสเกลาร์นั้น สามารถแทนพารามิเตอร์  $\phi$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $\phi$  ต่อหน่วยปริมาตร ตามที่นิยามไว้ใน (3.11) และ (3.13) สามารถแสดงได้ดังในตารางข้างล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x-momentum	$u$	$\rho \frac{Du}{Dt}$	$\partial \frac{(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u})$
y-momentum	$v$	$\rho \frac{Dv}{Dt}$	$\partial \frac{(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u})$
z-momentum	$w$	$\rho \frac{Dw}{Dt}$	$\partial \frac{(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u})$
Energy	$E$	$\rho \frac{DE}{Dt}$	$\partial \frac{(\rho E)}{\partial t} + \text{div}(\rho E \mathbf{u})$

รูปแบบที่ให้ไว้ในตารางข้างบนนี้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างสมการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานดังที่จะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดจากนี้

### 3.1.3 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ

กฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวไว้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหล เท่ากับ ผลรวมของแรง ที่กระทำต่ออนุภาค”

อัตราการเพิ่มโมเมนตัม ของอนุภาคของไหล = ผลรวมแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล

อัตราการเพิ่มโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของอนุภาคของไหลในทิศ  $x$ ,  $y$  และ  $z$  กำหนดได้โดย

$$\rho \frac{Du}{Dt} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (3.14)$$

เราแบ่งประเภทของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลเป็นสองแบบ คือ

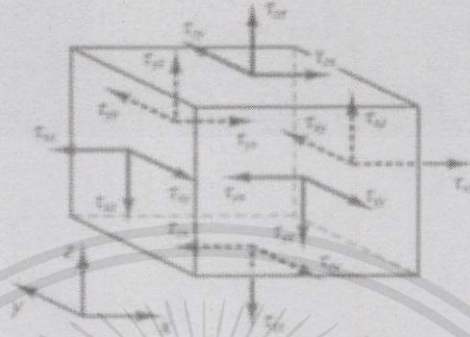
- แรงกระทำที่ผิว (surface forces) ได้แก่ แรงเนื่องจากความดัน แรงเนื่องจากความหนืด แรงโน้มถ่วง

- แรงกระทำในปริมาตร (body forces) ของชิ้นส่วนย่อยของของไหล ได้แก่ แรงหมุนหนีศูนย์กลาง แรงแม่เหล็กไฟฟ้า coriolis force

โดยทั่วไปเทอมของแรงกระทำที่ผิวจะถูกจัดกลุ่มแยกออกต่างหาก และเทอมของแรงกระทำภายในปริมาตรจะถูกพิจารณาเป็นเทอมของการเพิ่มและลดโมเมนตัมแยกออกมาอีกเทอมหนึ่ง

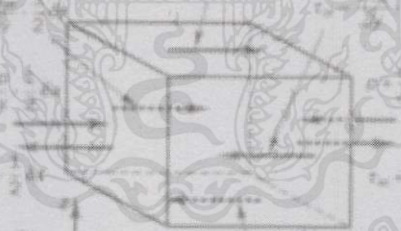
ความเค้นที่กระทำต่อชิ้นส่วนย่อยของของไหล สามารถนิยามได้ด้วยเทอมของความดัน และ เทอมความเค้นย่อยเนื่องจากความหนืด  $\mu$  ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ความดันซึ่งมองว่าเป็นความเค้นตั้งฉาก ถูกแทนด้วย  $p$  ส่วนความเค้นเฉือนเนื่องจากความหนืดแทนโดย  $\tau$  สัญลักษณ์  $\tau_{xy}$  ถูก

ประยุกต์ใช้เพื่อชี้ให้เห็นถึงทิศทางของความเค้นเนื่องจากความหนืด ตัวห้อย  $i$  และ  $j$  ใน  $\tau_{ij}$  ชี้ให้เห็นถึงความเค้นย่อย ที่กระทำในทิศทาง  $j$  บนพื้นที่ที่มีเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง  $i$  นั้นเอง



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทาง ของชิ้นส่วนของไหล

เริ่มแรกเราพิจารณาแรงกระทำในทิศทาง  $x$  เนื่องจากความดันและความเค้นย่อย  $\tau_{xy}, \tau_{yz}$  และ  $\tau_{xx}$  ดังในรูปที่ 3.4 ขนาดของแรงที่กระทำบนพื้นผิวเกิดจากผลคูณของความเค้นและพื้นที่ และมีทิศทางเดียวกับแกนอ้างอิงโดยมีเครื่องหมายบวก และมีค่าเป็นเครื่องหมายลบเมื่อทิศทางตรงข้าม แรงสุทธิในทิศทาง  $x$  คือ ผลรวมของแรงย่อยที่กระทำบนชิ้นส่วนย่อยของไหล ในทิศทางดังกล่าว



รูปที่ 3.4 องค์ประกอบของความเค้นในทิศทาง  $x$

เมื่อพิจารณาผิวหน้าที่ E, W เราได้ว่า

$$\left[ \left( \rho - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left( \tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z + \left[ - \left( \rho - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left( \tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \quad (3.14ก)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงสุทธิในทิศทาง  $x$  บนผิวหน้า N, S ได้ว่า

$$-\left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y\right) \delta x \delta z + \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y\right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (3.14ข)$$

แรงสุทธิในทิศทาง  $x$  บนผิวหน้า T, B ได้ว่า

$$-\left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z\right) \delta x \delta y + \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z\right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (3.14ค)$$

ผลรวมแรงต่อหน่วยปริมาตรทั้งหมดเนื่องจากความเค้นที่ผิวหน้าจะเท่ากับผลรวมของ (3.14ก), (3.14ข) และ (3.14ค) ที่หารด้วยปริมาตรสุทธิ

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (3.15)$$

เทอมที่ปรากฏ ใน (3.15) นี้ ยังไม่รวมการพิจารณาแรงกระทำภายในชิ้นส่วนของของไหล ซึ่งสามารถถูกรวมได้โดยการพิจารณาเป็นแหล่งสร้างหรือทำลายโมเมนตัมเป็นหน่วยของโมเมนตัมต่อปริมาตรต่อเวลาในทิศทาง  $x$

ในขั้นตอนนี้สมการโมเมนตัมในทิศทาง  $x$  หาได้โดยการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมในทิศทาง  $x$  และ อนุภาคการไหล (3.14) เท่ากับผลรวมของแรงในทิศทาง  $x$  ที่กระทำต่อชิ้นส่วนของไหลโดยความเค้นที่ผิว บวกกับอัตราการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัมในทิศทาง  $x$  เนื่องจากแรงภายในชิ้นส่วนของของไหลนั้นตามแนวแกน  $x$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (3.16ก)$$

ในทำนองเดียวกันโมเมนตัมในทิศทาง  $y$  จะเขียนได้ว่า

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (3.16ข)$$

และโมเมนตัมในทิศทาง  $z$  คือ

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (3.16ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
 ความดันมีลักษณะเป็นความเค้นอัดตั้งฉาก (compressive normal stress) ซึ่งโดยทั่วไปมีเครื่องหมายเป็นลบ ในขณะที่ความเค้นตั้งฉากเนื่องจากความหนืดมีลักษณะเป็นความเค้นดึง (tensile normal stress) จะมีเครื่องหมายบวก เทอมของการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัม  $S_{Mx} = 0$   $S_{My}$

= 0 และ  $S_{M_z}$  (3.16 ก-ค) คือ แรงกระทำภายในของแต่ละทิศทาง ตัวอย่างเช่นแรงกระทำภายในเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจะถูกกำหนดให้มีค่า

$$S_{M_x} = 0, S_{M_y} = 0 \text{ และ } S_{M_z} = -\rho g$$

### 3.1.4 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ

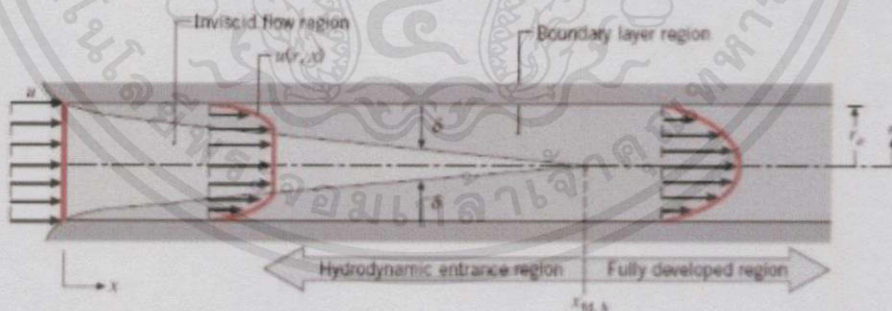
สมการพลังงานถูกหาได้จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่กล่าวไว้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของอนุภาคของไหล เท่ากับอัตราการเพิ่มความต้านแก่นุภาคบวกกับอัตราการทำงานของอนุภาคการไหล อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคของไหลต่อหน่วยปริมาตรคือ

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (3.17)$$

## 3.2 การไหลของของไหล

### 3.2.1 สภาวะการไหล

พิจารณาการไหลแบบราบเรียบ ในท่อกลมที่มีรัศมี  $r_0$  ตามรูปที่ 4.2



รูปที่ 3.5 การก่อตัวของบาวนด์ดาเลียเรเยอร์ของการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม

สำหรับการไหลภายในท่อนั้น ต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นอย่างไร แบบราบเรียบหรือปั่นป่วน เลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลภายในท่อกลมกำหนดเป็น

$$Re_D = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (3.18)$$

ซึ่ง  $u_m$  เป็นความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ

$D_h$  เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) ของท่อ

เลขเรย์โนลด์ส์วิกฤติ สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากราบเรียบเป็นปั่นป่วน เริ่มต้นจาก

$$Re_{D,C} \approx 2300$$

และการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ ที่  $Re_D \geq 4000$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (คือ  $Re_D \leq 2300$ ) ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวหาได้จากสมการ

$$\left( \frac{x_{fd,h}}{D_h} \right)_{lam} \approx 0.05 Re_D \quad (3.19)$$

### 3.2.2 ความเร็วเฉลี่ย (mean velocity)

ข้อแตกต่างของการไหลภายในและการไหลภายนอกก็คือ เราไม่สามารถใช้ความเร็วของ กระแสอิสระ  $u_\infty$  ของของไหลได้ เนื่องจากความเร็วภายในท่อจะแปรเปลี่ยนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังนั้นจึงใช้ความเร็วเฉลี่ย  $u_m$  (mean velocity) แทน โดยนิยามว่าความเร็วเฉลี่ยนี้ คือ ความเร็วที่เมื่อคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อและความหนาแน่นของของไหลแล้วจะเท่ากับอัตราการไหลของมวลซึ่งได้

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \quad (3.20)$$

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

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

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (3.21)$$

เพราะว่า ค่า  $\dot{m}$  อาจหาได้จากการอินทิเกรตของฟลักซ์มวล ( $\rho u$ ) ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c \quad (3.22)$$

ดังนั้นสำหรับท่อกลม กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ แล้วจะได้

$$u_m = \frac{\int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c}{\rho A_c} = \frac{2\pi\rho}{\rho\pi r_0^2} \int_0^{r_0} u(r, x) r dr = \frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} u(r, x) r dr \quad (3.23)$$

ซึ่งจะหาค่า  $u_m$  ได้ทันที เมื่อรู้รูปร่างของความเร็ว (velocity profile) ,  $u(r)$  ที่ตำแหน่งนั้น

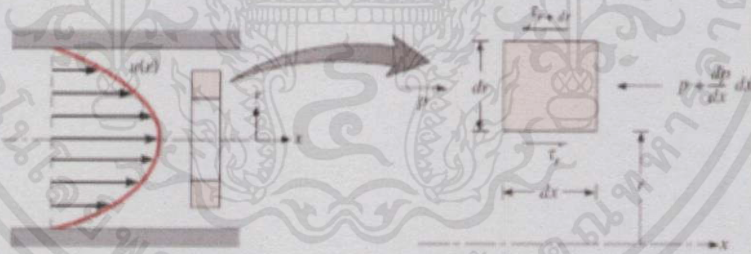
### 3.2.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

รูปทรงของความเร็วสามารถหาได้ สำหรับการไหลแบบราบเรียบของของไหลที่คุณสมบัติคงที่อัดตัวไม่ได้ ในช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้วของท่อกลม (สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนใหญ่ต้องอาศัยผลจากการทดลองเป็นหลัก) โดยทั่วไปจะเป็นฟังก์ชันของรัศมี สิ่งสำคัญสำหรับเงื่อนไขข้างต้นก็คือค่าความเร็วในแนวรัศมีและการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกนทุกๆ แห่งมีค่าเป็นศูนย์

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

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

ความเร็วตามแนวแกนหาได้ จากการแก้สมการที่เหมาะสมของสมการโมเมนตัม ตามแนว  $x$  หรืออาจจะหาโดยคิดสมดุลของการอนุรักษ์โมเมนตัมก็ได้ตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 สมดุลแรงบนอิลิเมนต์  $dx$  สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ก่อตัวเต็มที่ในท่อกลม

สำหรับอิลิเมนต์ดิฟเฟอเรนเชียลรูปวงแหวนของรูปที่ 4.3 สามารถเขียนสมดุลของแรงได้ดังนี้

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

ซึ่งลดรูปเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา -  $\frac{d}{dr} (r\tau_r) = r \frac{dp}{dx}$  - เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (3.24)

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

ดังนั้น (3.24) จะเป็น

$$\frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left( \frac{du}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} \quad (3.25)$$

เพราะว่า  $\frac{dp}{dx}$  นั้นไม่ขึ้นกับ  $r$  ดังนั้น เราสามารถอินทิเกรต (3.25) ได้

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

และ

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

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

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \left( \frac{dp}{dx} \right) r_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (3.26)$$

ดังนั้น รูปทรงของความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะเป็น “พาราโบลาและจะสังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน  $\left( \frac{dp}{dx} \right)$  ต้องเป็นลบเสมอ”

ผลลัพธ์ที่กล่าวมานี้อาจใช้หาความเร็วเฉลี่ยได้ ( $u_m$ ) โดยแทนสมการ (3.25) ใน (3.26) แล้วทำการอินทิเกรตจะได้

$$u_m = -\frac{r_0^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} \quad (3.27)$$

แทนสมการ (3.24) ใน (3.25) จะได้รูปร่างของความเร็วเป็น

$$\frac{u(r)}{u_m} = 2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (3.28)$$

เพราะว่า  $u_m$  สามารถหาได้จากการรู้อัตราการไหลของมวล ดังนั้นสมการ (3.26) สามารถหาความชัน  
 ไม่ว่ากรณีของความดันได้  $\left( \frac{dp}{dt} \right)$  ให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

### 3.2.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว

วิศวกรส่วนใหญ่ให้ความสนใจเกี่ยวกับความดันตกคร่อมในการไหลของของไหลภายในท่อ เนื่องจากตัวพารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับการหาขนาดกำลังงานของปั๊มหรือพัดลมโดยตรง ในการหาความดันตกคร่อม เราจะใช้ตัวประกอบเสียดทานของ Moody (หรือ Darcy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยนิยามว่า

$$f = \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2/2} \quad (3.29)$$

ค่านี้ต่างกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน  $C_f$  ซึ่งบางครั้งเรียกว่า “ตัวประกอบเสียดทานเฟนนิ่ง” ซึ่งนิยามว่า

$$C_f = \frac{\tau_s}{\rho u_m^2/2} \quad (3.30)$$

เพราะว่าแรงเฉือนบนผิวของของไหลเท่ากับ (ทิศทางตรงกันข้าม) แรงบนผิวของของไหล ดังนั้นความเค้นเฉือนบนผิวกำหนดเป็น  $\tau_s = -\mu(du/dr)_{r=r_0}$  จากสมการ (3.28) ได้

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (3.31)$$

แทนสมการ (3.28) และ (3.29) ลงใน (3.27) สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ได้

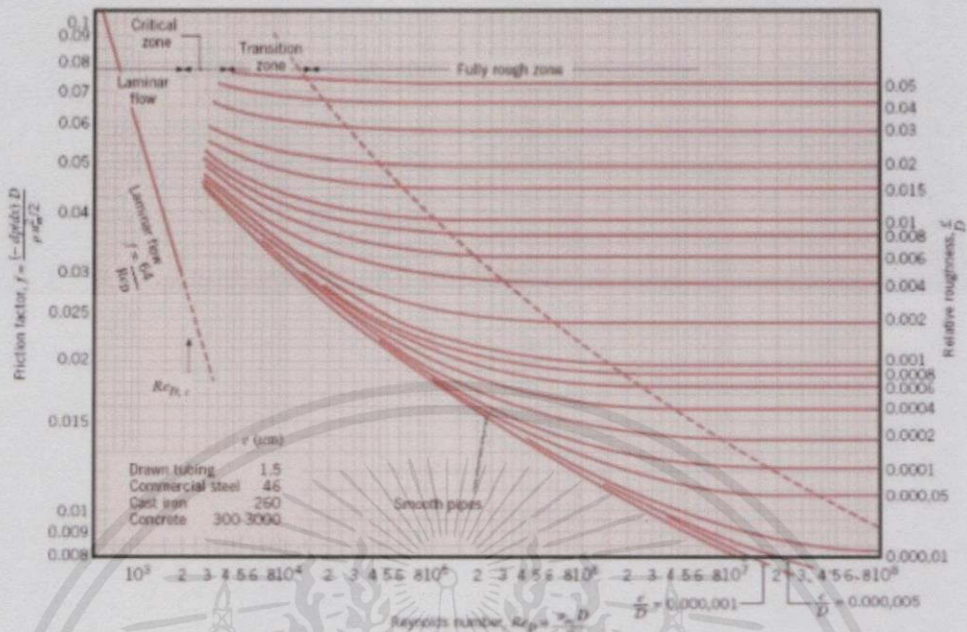
$$f = \frac{64}{\text{Re}_D} \quad (3.32)$$

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

$$\Delta p = -\int_{p_1}^{p_2} dp = f \frac{\rho u_m^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx = f \frac{\rho u_m^2}{2D} (x_2 - x_1) \quad (3.33)$$

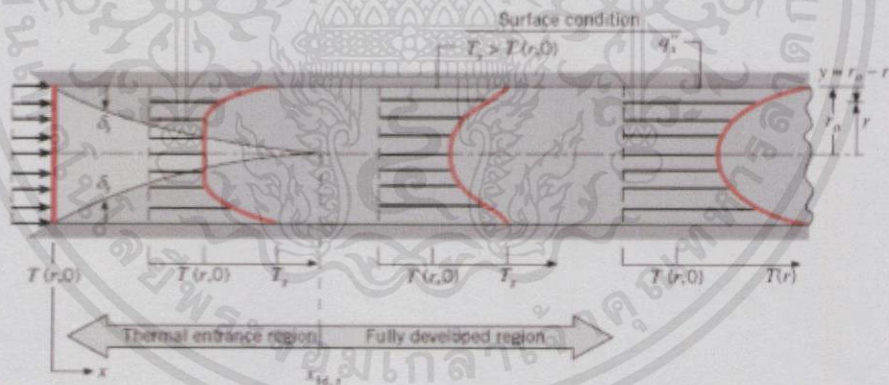
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการไหลแบบราบเรียบซึ่งค่า  $f$  หาได้จากรูปที่ 3.7 หรือจากสมการ (3.33)



รูปที่ 3.7 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม

### 3.3 การถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 3.8 การก่อตัวของ Boundary Layer ทางความร้อนในท่อกลม

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความร้อนข้างล่างของไหลไหลเข้าไปในท่อตามรูปที่ 3.8 ที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ  $T(r, 0)$  ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและ Boundary Layer ของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอคงที่ ( $T_s = \text{คงที่}$ ) หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ ( $q_s' = \text{คงที่}$ ) สภาวะที่ปรับตัวคงที่แล้วของความร้อน (thermally fully developed condition) ก็เกิดขึ้น ในที่สุดรูปร่างของ

อุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะแตกต่างกันตามเงื่อนไข ไม่ว่าจะกรณีอุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่

สำหรับการไหลแบบราบเรียบระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัว จะเป็น

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D}\right)_{lam} \approx 0.05 \text{Re}_D \text{Pr} \quad (3.34)$$

โดยการเปรียบเทียบบริเวณทางเข้า (entrance region) ของอุณหภูมิตามสมการ (4.17) กับสมการของความเร็ว (4.2) จะพบว่าต่างกันที่ค่า Pr เท่านั้น จึงพอสรุปได้ว่า ถ้า  $\text{Pr} > 1$  แล้ว Hydrodynamic Boundary layer ขยายเร็วกว่า Boundary layer ของความร้อนมาก ( $x_{fd} > x_{fd,t}$ ) และจะกลับกันถ้า  $\text{Pr} < 1$  สำหรับค่า Pr สูงๆ เช่น น้ำมัน ( $\text{Pr} \geq 100$ )  $x_{fd}$  จะน้อยกว่า  $x_{fd,t}$  มากมายและอาจ สมมุติได้ว่ารูปทรงของความเร็วที่ปรับตัวเต็มที่แล้วมีตลอดช่วงบริเวณทางเข้าของความร้อน ในทางกลับกันของไหลที่มีค่า Pr ต่ำมากๆ เช่น โลหะเหลว ( $\text{Pr} \leq 0.05$ ) รูปร่างอุณหภูมิอาจเป็นแบบอัดตัวเต็มที่แล้วได้เร็วมากในขณะที่รูปร่างของความเร็วยังอยู่ในช่วงกำลังก่อตัวอยู่ ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วนเงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ Pr และโดยการประมาณคร่าวๆ ก่อนได้ว่า

$$\frac{x_{fd,t}}{D} = 10$$

### 3.3.1 อุณหภูมิเฉลี่ย

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

$$T_m = \frac{\int_{Ac} \rho u c_v T dA_c}{\dot{m} c_v} \quad (3.35)$$

สำหรับท่อกลม และเป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ จะได้ว่า

$$T_m = \frac{2}{u_m r_0^2} \int_0^{r_0} u T r dr \quad (3.36)$$

ค่าของ  $T_m$  จะเปลี่ยนตามแนว  $x$  ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหล ซึ่งต่างจาก  $u_m$  ที่มีค่าคงที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลักซ์ความร้อน ( $q''_s$ ) ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.37)$$

ซึ่ง  $h$  เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใดๆ อย่างไรก็ตามมีความแตกต่างกันระหว่าง  $T_m$  และ  $T_\infty$  เนื่องจาก  $T_\infty$  คงที่ในทิศทางของการไหล ส่วน  $T_m$  ต้องเปลี่ยนแปลงตามทิศทางนั้นคือ  $dT_m/dx$  จะไม่เป็นศูนย์ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ  $T_m$  เพิ่มตามระยะ  $x$  ถ้าการถ่ายเทความร้อนเป็นไปจากผิวสู่ของไหล  $T_s > T_m$  และ  $T_m$  จะลดลงกับระยะ  $x$  ถ้า  $T_s < T_m$

### 3.3.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed conditions)

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหล คือ อุณหภูมิของไหลต้องยังคงเปลี่ยนแปลงตามระยะ  $x$  (สิ่งที่ยากรู้ คือ เกิดภาวะ thermal fully developed หรือยัง) สถานการณ์นี้จะแตกต่างไปจากกรณีการไหลของของไหลที่ซึ่ง  $(\partial u/\partial x) = 0$  ในช่วงบริเวณปรับตัวเต็มที่แล้ว ในทางกลับกันถ้ามีการพาความร้อนแล้ว  $dT_m/dx$  เช่นเดียวกับ  $(\partial T/\partial x)$  ที่รัศมี  $r$  ใดๆ จะไม่เป็นศูนย์ ผลที่ตามมารูปร่างของอุณหภูมิ  $T(r)$  จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ  $x$  ซึ่งเปรียบเสมือนว่า สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิเพื่อให้ได้เงื่อนไข

จากสำหรับการนำแบบทรานเซียนท์และสมการอนุพันธ์พลังงาน ได้ความแตกต่างอุณหภูมิไร้มิติในรูป  $(T_s - T)/(T_s - T_m)$  ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอยู่จริงซึ่งอัตราส่วนนี้จะเป็นอิสระกับ  $x$  นั่นคือ ถึงแม้ว่า  $T(r)$  ยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ  $x$  แต่รูปร่างสัมพัทธ์ของ profile นี้จะไม่เปลี่ยนแปลง และการไหลแบบนี้เรียกว่า “การไหลปรับตัวเต็มที่แล้วทางความร้อน” (thermally fully developed) และจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right) = 0 \quad (3.38)$$

โดยที่  $T_s$  เป็นอุณหภูมิผิวต่อ  $T$  เป็นอุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

$T_m$  เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (3.38) ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่ออาจจะเป็นกรณี  $q_s''$  คงที่หรือ  $T_s$  คงที่ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อที่ซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้า หรือ ผิวภายนอกที่ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ  $q_s''$  คงที่ ส่วนกรณี  $T_s$  คงที่หรือ  $T_s$  คงที่ จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอกท่อ

สังเกตว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะเกิดเงื่อนไขทั้งสองอย่างนี้พร้อมกัน (เกิดกรณี  $T_s$  และ  $q_s''$  คงที่ พร้อมกัน) ถ้า  $q_s''$  คงที่  $T_s$  ต้องแปรเปลี่ยนกับระยะ  $x$  รูปแบบที่สำคัญจำนวนมากของการไหลที่ปรับตัวแล้วทางความร้อน (thermally developed flow) มักอ้างถึงสมการ (3.38) เพราะว่าอัตราส่วนอุณหภูมินี้เป็นอิสระกับ  $x$  ค่าอนุพันธ์ของอัตราส่วนนี้เทียบกับ  $r$  ต้องไม่ขึ้นกับ  $x$  การหาค่าอนุพันธ์นี้ที่ผิวท่อ (สังเกตว่า  $T_s$  และ  $T_m$  คงที่) เราจะได้

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

แทน  $\partial T / \partial r$  จากกฎของฟูเรียร์ ซึ่ง จากรูป 3.8 อยู่ในรูป

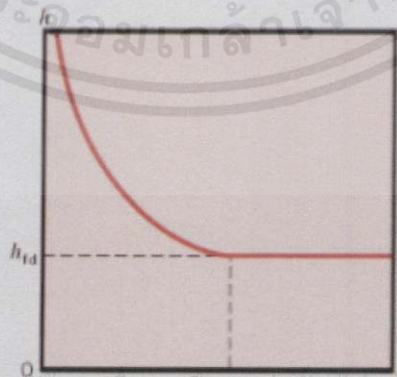
$$q_s'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0}$$

และสำหรับ  $q_s''$  จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน จะได้

$$\frac{h}{k} \neq f(x) \quad (3.39)$$

ดังนั้นการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิของของไหล โดยมีคุณสมบัติต่างๆคงที่ ค่า  $h$  ที่ตำแหน่งใดๆจะคงที่ไม่ขึ้นกับระยะ  $x$

สมการ(3.24) ใช้ไม่ได้กับช่วงระยะทางเข้า (entrance region) ที่ซึ่ง  $h$  แปรตาม  $x$  ตามที่แสดงในรูปที่ 3.9 เพราะว่า  $\delta_t = 0$  ที่ทางเข้าของท่อ ดังนั้น  $h$  จะมีค่าสูงมากที่  $x = 0$  อย่างไรก็ตาม ค่า  $h$  จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิด Boundary Layer ของอุณหภูมิขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งก็คือเข้าสู่ ช่วงปรับตัวเต็มที่แล้วนั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอให้นักเรียนและคณาจารย์ทุกท่านช่วยกันดูแลรักษาเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลง  $h$  ตามแนวแกน สำหรับการไหลภายในท่อ

กรณีพิเศษ สำหรับฟลักซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) คงที่ เพราะว่าทั้งค่า  $h$  และ  $q_s''$  คงที่ ในช่วงปรับตัวเต็มที่แล้ว จากสมการ (3.39) ได้ว่า

$$\left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{fd,t} = \left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{fd,t} \quad q_s'' = \text{constant} \quad (3.40)$$

ถ้ากระจาย (3.38) และหาคำตอบสำหรับ  $\partial T/\partial x$  จะได้

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{fd,t} = \left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{fd,t} - \frac{(T_s - T)dT_s}{(T_s - T_m)dx} \Big|_{fd,t} + \frac{(T_s - T)dT_m}{(T_s - T_m)dx} \Big|_{fd,t} \quad (3.41)$$

แทนค่าจากสมการ (3.41) ได้

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{fd,t} = \left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{fd,t} \quad q_s'' = \text{constant} \quad (3.42)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวแกนจะเป็นอิสระกับตำแหน่งในแนวรัศมี

สำหรับกรณีของ  $T_s$  คงที่ ( $dT_s/dx = 0$ ) จากสมการ (3.42) ได้ว่า

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{fd,t} = \frac{(T_s - T)dT_m}{(T_s - T_m)dx} \Big|_{fd,t} \quad T_s = \text{constant} \quad (3.43)$$

โดยที่ค่า  $\partial T/\partial x$  จะขึ้นอยู่กับแนวรัศมี

จากที่กล่าวมาพอเชื่อถือได้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยเป็นตัวแปรที่สำคัญมากสำหรับการไหลภายในท่อ เพื่อที่จะอธิบายการไหลนั้นๆ จำเป็นต้องรู้การแปรเปลี่ยนของมันกับค่า  $x$  ซึ่งการแปรเปลี่ยนหาได้ โดยการประยุกต์การสมดุลพลังงานทั้งหมดกับการไหล

### 3.4 สหพันธ์การพาความร้อนสำหรับท่อที่ไม่กลม











ถึงแม้ว่าเรามีข้อจำกัดมากเกี่ยวกับการพิจารณาต่อการไหลภายในท่อกลม การประยุกต์ทางวิศวกรรมส่วนใหญ่จำนวนมากเกี่ยวข้องกับพาความร้อนในท่อที่ไม่กลม สมการที่กล่าวมาแล้วใช้ได้ดีพอประมาณกับท่อที่ไม่มีพื้นที่หน้าตัดกลม โดยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางลิทธิผลเป็นความยาวเฉพาะ (characteristic length) ซึ่งเรียกว่า “เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก” (hydraulic diameter) และนิยามเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ  $D_h = \frac{4A_c}{P}$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (3.44)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และส่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

สำหรับกรณีเช่นนั้น ค่า  $Nu_D$  สอดคล้องกับเงื่อนไขปรับตัวเต็มที่ที่สามารถหาได้จากตารางที่ 3.1 สำหรับการไหลแบบราบเรียบ เนื่องจากท่อมีหลายรูปร่างลักษณะ หากนำค่าสหพันธ์ที่ใช้ในท่อกลมมาใช้กรณีนี้อาจให้ความแม่นยำน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพื้นที่หน้าตัดที่มีมุมคมหลายมุม

3.5 สมรรถนะเชิงความร้อน (thermal performance)

Promvonge (2006) นำเสนอสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนซึ่งคำนวณได้จาก

$$TEF = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \tag{3.45}$$

เมื่อ  $TEF$  คือ สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  $Nu$  คือ เลขนัสเซลของท่อกลมที่ติดแผ่นบิด

$Nu_0$  คือ เลขนัสเซลของท่อกลมผิวเรียบ

$f$  คือ ตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมที่ติดแผ่นบิด

$f_0$  คือ ตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล

ในการศึกษาทางพลศาสตร์ของของไหลนั้นนอกจากการจำลองการถ่ายเทความร้อนและสภาวะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นบิตแบบต่างๆ ความเข้าใจทางทฤษฎีพื้นฐาน ยังต้องมีความเข้าใจถึงวิธีหาคำตอบเชิงตัวเลข (Numerical Solution) ด้วย เนื่องจากเป็นเครื่องมือหลักสำหรับการหาผลเฉลยของสมการคณิตศาสตร์อันซับซ้อน โดยสามารถใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสมในการหาคำตอบหรือผลเฉลยของสมการอนุพันธ์เหล่านั้นตามเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ ที่กำหนดขึ้น

#### 4.1 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

ในยุคที่ระบบคอมพิวเตอร์เริ่มมีการพัฒนา ทำให้เกิดวิวัฒนาการของการคำนวณเชิงตัวเลข Anderson (1950) ขึ้นในช่วงเวลานั้นการคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล (computational fluid dynamics, CFD) นิยมใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference methods, FDM) และระเบียบวิธีผลต่างมูลฐาน (finite element methods, FEM) เป็นวิธีพื้นฐานในการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equations, PDE) ต่อมาได้รวบรวมเอาองค์ความรู้ทางระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและระเบียบวิธีผลต่างมูลฐานเข้าไว้ด้วยกัน (Chung (2002)) เรียกว่า ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume methods, FVM) ทำให้ได้โครงสร้างที่เข้าใจง่ายขึ้น ในขณะที่ยังมีความแม่นยำสูงจนเป็นที่นิยมในปัจจุบัน

#### 4.2 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล

วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมถูกพัฒนาแรกเริ่มจากวิธีของผลต่างสี่เหลี่ยมแบบ Spectral กล่าวคือ มีการตัดพจน์อันดับสูงออก สำหรับลำดับขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลขของวิธีการนี้ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) การอินทิเกรตสมการควบคุมของของไหลทั้งปริมาตรควบคุมเล็กๆ ทุกปริมาตร ภายใต้ขอบเขตของปัญหา
- 2) การแปลงรูปสมการ ซึ่งประกอบไปด้วยการแทนค่าเทอมต่างๆ (การพา การแพร่ การก่อกวน หรือการสูญเสีย) ของสมการควบคุมที่อินทิเกรตแล้วนั้น ด้วยการประมาณค่าที่อยู่ในรูปแบบที่เหมือนกับผลต่างสี่เหลี่ยม คือ เป็นเทอมที่อยู่ในรูปแบบของค่าผลเฉลยที่โหนด การประมาณค่าดังกล่าวมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ทั้งนี้การแปลงรูปสมการนี้ทำให้เกิดระบบสมการพีชคณิตขึ้น
- 3) การหาคำตอบของสมการพีชคณิตโดยวิธีการกระทำซ้ำ (iterative processes)

ขั้นตอนแรก คือ การอินทิเกรตปริมาตรการควบคุม พิจารณาอยู่บนพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์ สสาร และพลังงานตามหลักทางฟิสิกส์ไว้ในแต่ละเซลล์เล็กๆที่มีขนาดแน่นอนเหล่านั้น สิ่งนี้เองที่ทำให้เกิดความชัดเจนในความสัมพันธ์ระหว่างลำดับขั้นการคำนวณเชิงตัวเลข (Algorithm) กับกฎการอนุรักษ์ปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐาน จึงทำให้ง่ายในการทำความเข้าใจแนวคิดของวิธีปริมาตรสับเนื่องมากกว่าวิธีผลต่างสับเนื่อง วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และวิธีเสป็คตรัลและเทคนิค CFD อื่นๆ โดยการอนุรักษ์ตัวแปรการไหลในกรณีทั่วไป เช่น ค่า  $\phi$  สำหรับตัวอย่างเช่น ความเร็วในแนวแกนหรือเอ็นทาลปี ภายในปริมาตรควบคุม สามารถอธิบายเป็นสมมูลระหว่างกระบวนการต่างๆ เราสามารถเขียนได้ว่า

อัตราการเพิ่มขึ้นของ $\phi$	=	ฟลักซ์สุทธิของ $\phi$	+	ฟลักซ์สุทธิของ $\phi$	+	อัตราการเพิ่ม $\phi$
สุทธิภายในปริมาตรควบคุม		เนื่องจากการพาไป		เนื่องจากการแพร่		ในปริมาตรควบคุม
เทียบกับเวลา		ปริมาตรควบคุม		ในปริมาตรควบคุม		

การคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหลประกอบด้วยเทคนิคการแปลงรูปที่เหมาะสม สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์การเคลื่อนย้ายที่จะประกอบไปด้วยเทอมของการพา (เนื่องจากการไหลของของไหล) และเทอมของการแพร่ (เนื่องจากความไม่เท่ากันของค่า  $\phi$  ระหว่างจุดหนึ่งกับอีกจุดหนึ่ง) รวมทั้งเทอมของแหล่งกำเนิดหรือทำลาย (เทียบกับการสร้างและการทำลายของ  $\phi$ ) และเทอมของอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ขั้นพื้นฐานมีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการหาคำตอบแบบกระทำซ้ำจึงเป็นสิ่งที่ต้องนำมาใช้ วิธีการหาคำตอบที่นิยมใช้มากที่สุด คือ TDMA แบบ Line by line ส่วนลำดับขั้นของการหาคำตอบ คือ แบบ SIMPLE ให้แน่ใจว่าการเชื่อมโยงระหว่างความดันและความเร็วถูกต้อง โปรแกรมเชิงพาณิชย์บางตัวอาจจะให้ผู้ใช้เลือกเทคนิคที่ทันสมัยกว่า เช่น Stone's Algorithm และวิธี Conjugate gradient เป็นต้น

#### 4.3 การประเมินสมรรถนะของการคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของของไหลเพื่อจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติ ควรตระหนักว่าธรรมชาติมักมีพฤติกรรมซับซ้อน ดังนั้นสิ่งที่พึงระวังอย่างยิ่ง คือ ความถูกต้องของผลเฉลย ผลการคำนวณที่ดีเลิศ เป็นเพียงค่าประมาณที่ดีที่สุดเท่าที่มนุษย์สามารถหาคำตอบได้เท่านั้น ไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรง สำหรับหลักสำคัญในการประเมินสมรรถนะของกระบวนการวิธีเชิงตัวเลขซึ่งเป็นปัจจัยบ่งบอกความเที่ยงตรงของผลเฉลยประมาณค่า เมื่อเทียบกับพฤติกรรมจริงที่ควรเกิดขึ้น แบ่งได้หลายประการดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1 ความเข้ากันได้

ความเข้ากันได้ (consistency) หมายถึงความเหมือน (equivalent) ระหว่างสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย) และสมการพีชคณิตที่ผ่านกระบวนการดิสครีไทต์ เมื่อระยะกริด (grid spacing) หรือค่าขั้นเวลา (time step) ลดลงใกล้ศูนย์ โดยปกติเรียกความแตกต่างหลังจากกระบวนการดิสครีไทต์ว่า ความผิดพลาดแบบทรานเคชัน (truncation error) ซึ่งลดลงเมื่อมีความเข้ากันได้มากขึ้น

#### 4.3.2 เสถียรภาพการคำนวณ

เสถียรภาพการคำนวณ (stability) เป็นลักษณะการคำนวณที่มีค่าผิดพลาดน้อยลงเมื่อคำนวณซ้ำ (damping of error) เรียกความผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณซ้ำว่าความผิดพลาดแบบเร้าออฟ (round-off error) เช่นความผิดพลาดในการคำนวณทศนิยมตำแหน่งที่ 12 ของคอมพิวเตอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากวิธีการคำนวณไม่มีเสถียรภาพ ผลการคำนวณอาจมีลักษณะลู่ออก (divergence) โดยมักเกิดจากการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ถูกต้อง หรือแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขไม่เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา ซึ่งการตรวจสอบเสถียรภาพการคำนวณต้องใช้ความรู้ของทฤษฎีการรบกวน (perturbation theory) เป็นแนวทาง

#### 4.3.3 การลู่เข้าของผลเฉลย

ผลการคำนวณที่มีการลู่เข้าของผลเฉลย (convergence) เป็นลักษณะที่บ่งชี้ถึงการที่ผลเฉลยของวิธีการเชิงตัวเลขนั้นๆ จะมีค่าใกล้เคียงกับคำตอบแน่นอนตรงมากขึ้น เมื่อจำนวนครั้งของการทำซ้ำ (iteration) มากขึ้น หรือสามารถกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า เป็นการที่กระบวนการวิธีเชิงตัวเลขนั้นให้ผลเฉลยใกล้กับกับผลเฉลยแบบแน่นอนตรง เมื่อขนาดของปริมาตรเล็กๆที่ใช้ในการสร้างสมการแปลงรูปนั้นมีขนาดเล็กเข้าใกล้ศูนย์ สำหรับปัญหาไม่เชิงเส้น (nonlinear problem) ยากที่จะตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลย เนื่องจากไม่สามารถหาผลเฉลยแน่นอนตรงได้ อย่างไรก็ตามการตรวจสอบทำได้ด้วยวิธีเปรียบเทียบผลการคำนวณที่มีระยะกริดลดลง กระทั่งผลเฉลยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะกริด (grid independent) เรียกได้ว่ามีคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลยที่ดี

#### 4.3.4 การอนุรักษ์

คุณสมบัติการอนุรักษ์ (conservation) เป็นคุณสมบัติที่มีอยู่ในกฎการอนุรักษ์ดั่งบทที่ 3 เนื่องจากผลการคำนวณมีที่มาจากสมการควบคุม ดังนั้นวิธีการคำนวณจึงควรมีคุณสมบัตินี้ด้วย โดยคุณสมบัติการอนุรักษ์เป็นจุดเด่นที่สำคัญของระเบียบวิธีปริมาตรสับเนื่อง กล่าวคือ คำนึงถึงความสมดุลของการส่งถ่ายปริมาณข้ามขอบเขตที่พิจารณา เช่นรอบผิวปิดของปริมาตรเล็กๆที่แบ่งตามระยะกริดเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.5 ความจำกัดขอบ

ความจำกัดขอบ (bounded ness) หมายถึงผลเฉลยควรมีค่าอยู่ในขอบเขตจำกัด เช่น ความหนาแน่น ความเข้มข้นต้องมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ หรือระบบการถ่ายเทความร้อนที่ทราบอุณหภูมิต่ำสุด-สูงสุด ผลเฉลยที่ควรได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วงนั้นด้วยเช่นกัน โดยวิธีการคำนวณที่มีอันดับสูง (higher order) มีแนวโน้มความจำกัดขอบต่ำลง ดังนั้นจึงไม่ควรเลือกใช้วิธีการคำนวณที่มีอันดับสูงมากเกินไปจนความจำเป็น

#### 4.3.6 ความเสมือนจริง

ความเสมือนจริง (realizability) หมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่จำลองพฤติกรรมธรรมชาติที่ซับซ้อน เช่นแบบจำลองการไหลปั่นป่วน แบบจำลองการเผาไหม้ เป็นต้น ควรเลือกแบบจำลองที่มีความเสมือนจริงเมื่อเทียบกับความหมายทางกายภาพ หากเลือกใช้ หรือนำมาใช้ไม่สอดคล้องกับปัญหา ผลเฉลยที่ได้ อาจไม่สื่อความหมายทางกายภาพที่ถูกต้อง

#### 4.3.7 ความแน่นอน

บ่อยครั้งในงานทางวิศวกรรมกล่าวถึงความแน่นอน (accuracy) ซึ่งมักใช้สับสนกับความแม่นยำ (precision) แสดงความแตกต่างระหว่างแนวคิดทั้งสองอย่างชัดเจน ตรงกลางเป่าเป็นเสมือนค่าแม่นยำตรง โดยเห็นได้ว่าความแน่นอนสูง หมายถึงค่าโดยเฉลี่ยไม่ต่างจากค่าแม่นยำตรง และความแม่นยำสูง หมายถึงค่าส่วนใหญ่วางกระจายตัวน้อย ดังนั้นงานวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมจึงควรให้ความสำคัญของความแน่นอนมากกว่าความแม่นยำ ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์ได้ถูกต้อง มีแนวโน้มเดียวกับสภาพความจริงมากขึ้น แต่ในงานออกแบบต้องการความผิดพลาดลดน้อยที่สุด จึงควรใช้ทั้ง 2 แนวคิดประกอบรวมกัน

สำหรับวิธีไฟไนต์โวลูมที่นำมาใช้ในงานนี้เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้หลักการสมดุลฟลักซ์ของคุณสมบัติการไหล วิธีการนี้จึงให้ความสอดคล้องกับเงื่อนไข “การอนุรักษ์ (Conservativeness)” ของคุณสมบัติการไหล เงื่อนไข “การจำกัดขอบเขต (Boundedness)” เป็นเงื่อนไขที่ใช้กำกับปัญหาที่ไม่มีพจน์ซ้อน เป็นการวางกรอบว่าผลเฉลยที่ได้จะต้องมีค่าอยู่ในช่วงค่าเงื่อนไขขอบที่มากที่สุดและน้อยที่สุด ซึ่งจะสัมพันธ์กับขนาดและเครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ในสมการดิสครีทส์ การศึกษาคุณสมบัติการจำกัดขอบเขตของปัญหาการไหลเดียวกัน ส่วนสุดท้ายที่จะกล่าวถึง คือ เงื่อนไข “การขนส่ง (Transportiveness)” ในการไหลนั้นพบว่ามีกระบวนการ 2 อย่างเข้ามาเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลเสมอ คือ การพาและการแพร่ การแพร่เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าคุณสมบัติระหว่าง 2 จุดใดๆ ยกตัวอย่างเช่น การนำความร้อน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดหนึ่งจะส่งผลให้จุดรอบข้างมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปด้วย การแพร่จึงเป็นการขนส่งคุณสมบัติที่กระจายผลกระทบ ออกไปเท่ากันในทุกทิศทาง โดยอาศัยตัวกลางที่อาจจะเคลื่อนที่หรือไม่ก็ได้ ส่วนการพาเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของตัวกลางจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง กระบวนการนี้จะนำเอาคุณสมบัติของของไหลให้เคลื่อนย้ายไปพร้อมกับการไหลตัวของไหล ดังนั้นกระบวนการนี้จะส่งผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลในทิศการไหลเท่านั้น

กระบวนการขนส่งทั้งสองแบบดังกล่าวมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ปัญหาการไหลมาก แผนวิธีประมาณค่าเชิงตัวเลขแบบต่างๆ ที่นำไปสู่การสร้างสมการดิสครีทส์ ที่จะนำเสนอต่อไปในที่นี่ ก็ใช้สัดส่วนของพจน์การแพร่และการพาที่เรียกว่า ความเข้มข้นของการแพร่ต่อการพามาพิจารณาด้วย



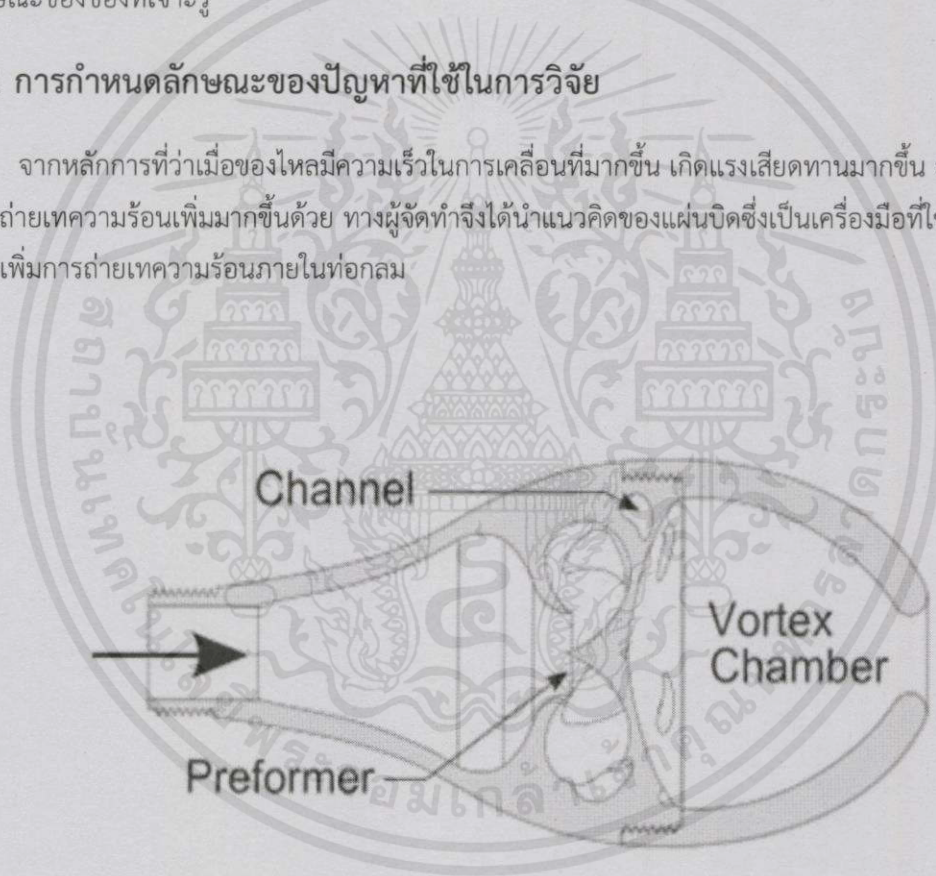
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การกำหนดปัญหาและตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

ในบทนี้เป็นการกำหนดลักษณะของปัญหา แนวคิดที่ใช้สำหรับทำการศึกษาวิจัยและพร้อมทั้ง ทำการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ได้นำมาใช้ สำหรับลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนนี้คือท่อกลมที่ติดตั้งแผ่นบิตในท่อจัดวางแบบตรงกันโดยการเจาะรู, ระยะพิตช์ของการบิต, ลักษณะของช่องที่เจาะรู

### 5.1 การกำหนดลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย

จากหลักการที่ว่าเมื่อของไหลมีความเร็วในการเคลื่อนที่มากขึ้น เกิดแรงเสียดทานมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นด้วย ทางผู้จัดทำจึงได้นำแนวคิดของแผ่นบิตซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการใส่เพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลม



รูปที่ 5.1 Vortex Generator

Vortex generator คือ สิ่งที่เปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของของไหลให้อยู่ในรูปการไหลหมุนวน เพื่อนำพลังงานจากบริเวณการไหลที่มีความเร็วสูงกว่าได้ไหลเข้าสู่บริเวณที่มีความเร็วในการไหลที่ต่ำกว่า (บริเวณผิวท่อ) โดยใช้การหมุนวนของของไหล โดยควบคุมการไหลแยกออกให้มัน้อยที่สุด ซึ่งความเร็วที่เพิ่มขึ้นบริเวณผิวท่อนี้เองที่ส่งผลให้เกิดอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 สมการควบคุมและเงื่อนไขที่ทำการศึกษา

การพัฒนาแบบจำลองตัวเลขสำหรับการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม โดยกำหนดสมมติฐานให้การไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ, คุณสมบัติของของไหลคงที่, การไหลเป็นแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้ ไม่คำนึงแรงเนื่องจากน้ำหนักและการสูญเสียเนื่องจากความหนืดและไม่มีการคำนึงการแผ่รังสีความร้อน

จากสมมติฐานข้างต้น สำหรับการไหลในท่อกลม สมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน สามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังนี้

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

$$\text{สมการโมเมนตัม: } \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j})] \quad (5.2)$$

$$\text{สมการพลังงาน: } \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} ((\Gamma + \Gamma_r) \frac{\partial T}{\partial x_j}) \quad (5.3)$$

เมื่อ  $\Gamma$  และ  $\Gamma_r$  คือการแพร่ทางความร้อน กำหนดโดย

$$\Gamma = \frac{\mu}{Pr} \text{ และ } \Gamma_r = \frac{\mu_r}{Pr_r} \quad (5.4)$$

## 5.3 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

สภาวะทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translation อากาศไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลอย่างสม่ำเสมอ และมีค่าเลขพรานด์ (Prandtl number,  $Pr$ ) คงที่เท่ากับ 0.707 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังความเร็วมีค่า เท่ากับศูนย์ (no slip condition) เป็นผนังที่อยู่กับที่ (stationary wall) กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนของแผ่นบิตมีค่าเท่ากับศูนย์ (แผ่นบิตเป็นฉนวน) ให้ที่ผนังในส่วนที่ใช้ในการทดสอบทุกด้านของท่อกลมมีฟลักซ์ความร้อนคงที่  $600 \text{ w/m}^2$  มีอุณหภูมิผิวคงที่ 310 K

ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรที่ให้ความสนใจอยู่ 4 ตัวแปร คือ เลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) เลขนัสเซล ( $Nu$ ) และสมรรถนะเชิงความร้อน ( $TEF$ ) ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์นิยามโดย

$$Re = \frac{\rho u_0 D}{\mu} \quad (5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประกอบเสียดทาน  $f$  คำนวณได้จากความดันตกคร่อม,  $\Delta p$  ตลอดช่วงความยาว ของท่อสี่เหลี่ยม จตุรัส,  $L$

$$f = \frac{(\Delta P)D}{2\rho u^2_0 L} \quad (5.6)$$

การถ่ายเทความร้อนในรูปของค่าการกระจายเลขนัสเซลซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$Nu_x = \frac{h_x D}{k} \quad (5.7)$$

ค่าเลขนัสเซลเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จาก

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_x dA \quad (5.8)$$

สมรรถนะเชิงความร้อน,  $TEF$

$$TEF = \frac{(Nu / Nu_0)}{(f / f_0)^3} \quad (5.9)$$

เมื่อ  $Nu_0$  และ  $f_0$  คือ เลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่ได้มีการติดตั้ง แผ่นบิดวางเอียงตามลำดับ

แบบจำลอง *Realizable  $k-\epsilon$*  ซึ่งเป็นแบบจำลองที่แสดงพฤติกรรมการไหลของของไหลเมื่อ เข้าปะทะกับตัวสร้างความปั่นป่วน โดยทั่วไปเมื่อของไหลตกกระทบกับตัวสร้างความปั่นป่วน ของไหล จะมีพลังงานจลน์มากขึ้นทำให้เกิดความปั่นป่วนมากขึ้น แต่หลังจากนั้นของไหลจะสูญเสียพลังงานใน การสร้างความปั่นป่วนไปเมื่อได้ไหลผ่านตัวสร้างความปั่นป่วนนั้นไปตามระยะทาง โดยสมการนี้ถูก พัฒนามาจาก *Standard  $k-\epsilon$*  กำหนดโดย

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \mu_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon \mu_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b - S_\epsilon \quad (5.11)$$

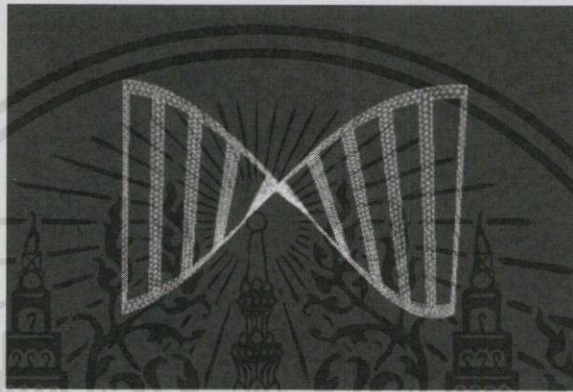
โดยที่  $G_k$  และ  $G_b$  คือ การเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ย และแรงลอยตัวตามลำดับ  $Y_M$  คือ ผลกระทบจากการอัดตัวได้,  $C_2$  และ  $C_{1\epsilon}$  คือ ค่าคงที่,  $\sigma_k$  และ  $\sigma_\epsilon$  คือเลขพรานด์ของ  $k$  และ  $\epsilon$

## 5.4 การกำหนดลักษณะปัญหาที่ต้องการศึกษา

งานวิจัยนี้ระบบที่ให้ความสนใจเป็นท่อกลมติดตั้งแผ่นบิดเจาะรูภายในท่อ โดยวิจัยเป็นกรณีพื้นฐาน

### 5.4.1 กรณีศึกษาพื้นฐานแผ่นบิดเจาะรู

กรณีระยะห่างของรูแต่ละรูโดยมีกรณีศึกษาพื้นฐานแผ่นบิดเจาะรู (Basic Case) และ (0.2 Basic Case) แผ่นบิดเจาะรูทั่วไปที่มีจำนวนรูน้อยลงสองเท่าขนาดความสูงของท่อหน้าตัดวงกลมที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า  $D = 0.05 \text{ m}$  และสมมติว่าท่อยาวมาก



รูปที่ 5.2 กรณีศึกษาพื้นฐานแผ่นบิดเจาะรู

### 5.4.2 กรณีอัตราส่วนการบิด

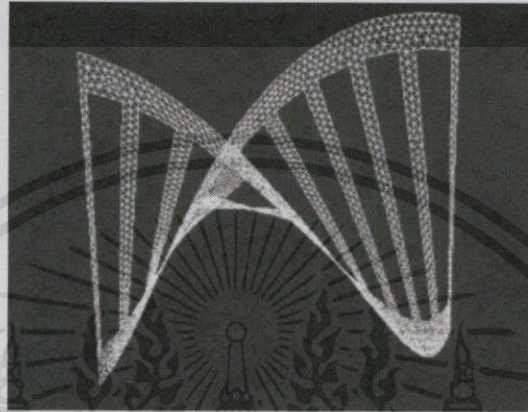
อัตราส่วนการบิด (Twisted Ratio)  $TR$  ของแผ่นบิดมีค่าเท่ากับ 1.50, 2.00 และ 4.00 ตามลำดับกำหนดให้  $y$  คือระยะพิตช์ของแผ่นบิดและ  $w$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นบิดขนาดความสูงของท่อหน้าตัดวงกลมที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า  $D = 0.05 \text{ m}$  และสมมติว่าท่อยาวมาก อัตราส่วนการบิด คัดได้จากระยะพิตช์ของแผ่นบิดกับเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นบิด ( $y/w$ )



รูปที่ 5.3 แผ่นบิดที่เจาะรูในกรณีอัตราส่วนการบิด

### 5.4.3 กรณีอัตราส่วนความยาว

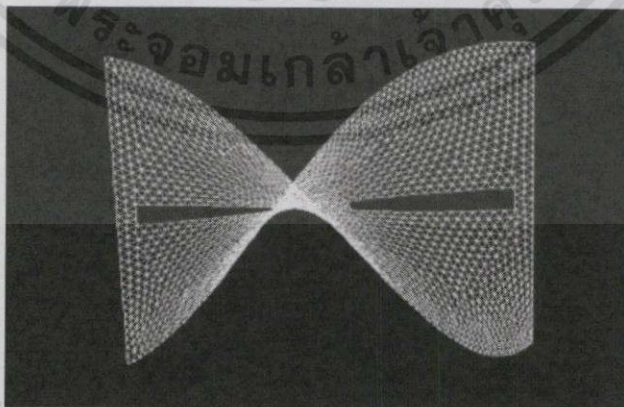
อัตราส่วนความยาว (Length Ratio,  $L/w$ ) ที่ซึ่งกำหนดให้  $L$  คือความยาวของรูบนแผ่นบิตและ  $w$  คือความกว้างของรูบนแผ่นบิต โดยที่คงระยะความกว้างของรูบนแผ่นบิตไว้ตามเดิม และเปลี่ยนแปลง ความยาวของรูบนแผ่นบิตเป็น 3 ค่ามีค่าเท่ากับ 0.30, 0.44 และ 0.78 ขนาดความสูงของท่อหน้าตัดวงกลมที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า  $D = 0.05$  m และสมมติว่าท่อยาวมาก



รูปที่ 5.4 แผ่นบิตที่เจาะรูในกรณีอัตราส่วนความยาว

### 5.4.4 กรณีอัตราส่วนความกว้าง

อัตราส่วนความกว้าง (Width Ratio,  $WR$ ) ของแผ่นบิตมีค่าเท่ากับ 0.07, 0.20 และ 0.40 ตามลำดับ  $L$  คือความยาวของรูบนแผ่นบิตและ  $w$  คือความกว้างของรูบนแผ่นบิต โดยที่คงระยะความยาวของรูบนแผ่นบิตไว้ตามเดิม ขนาดความสูงของท่อหน้าตัดวงกลมที่ใช้ในการจำลองนี้มีค่า  $D = 0.05$  m และสมมติว่าท่อยาวมาก



รูปที่ 5.5 แผ่นบิตที่เจาะรูในกรณีอัตราส่วนความกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลใดๆในเอกสารนี้ไปยังบุคคลอื่นใดในโอกาสใดๆทั้งสิ้น

## 5.5 การตรวจสอบความแม่นยำของโปรแกรม

### 5.5.1 การตรวจสอบเหมาะสมของแบบจำลองจากจำนวนกริดเซลล์

กริดที่ใช้สำหรับกรณีการติดตั้งแผ่นปิดเจาะรู ดังแสดงในตารางที่ 5.1 เป็นแบบสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม แบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (non-uniform grid) พิจารณาบริเวณที่ติดตั้งให้มีจำนวนกริดหนาแน่น และบริเวณที่ห่างออกไปจากผนังก็มีจำนวนกริดเบาบางลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณผิวท่อหรือขอบท่อจะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่บริเวณส่วนกลางท่อ สำหรับการหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบได้ทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณของกริดที่แตกต่างกัน ที่จำนวน 70000, 98153, 123127, 240104, 303452 และ 542920 ใช้ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE และใช้แบบแผนวิธีผลต่างอันดับหนึ่ง เงื่อนไขการลู่เข้าหาคำตอบของทุกค่าอยู่ที่  $10^{-5}$  ยกเว้นสมการพลังงานซึ่งอยู่ที่  $10^{-9}$  พบว่าเมื่อจำนวนกริดเพิ่มขึ้นจาก 240,104 เป็น 542,920 ค่า  $Nu$  มีความคาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง 0.52% ส่วนค่าเลขนัสเซลมีความคาดเคลื่อนจากผลเฉลยแม่นยำตรง 0.43% ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งทั้งค่าเลขนัสเซลและความเสียดทานมีความสอดคล้องกันดีกับผลเฉลยแม่นยำตรง และเมื่อทำการปรับปรุงกริดเซลล์แล้วและเมื่อเพิ่มค่าจำนวนกริดเซลล์เป็น 240,104 พบว่าทั้งค่าตัวเลขนัสเซลและค่าตัวประกอบความเสียดทานมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยดังนั้นจึงเลือกปริมาณของกริดที่ 240,104 ซึ่งปริมาณกริดนี้จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อไป

ตารางที่ 5.1 ตารางกริดอิสระ

Grid Number	Nu	F	Nu Error (%)	f Error (%)	Pressure Gradient
542920	56.52	2.228659937	0	0	-23.36
303452	57.08	2.185727704	0.990700717	1.926369863	-22.91
240104	56.78	2.176187207	0.525578136	0.436490615	-22.81
123127	59.33	2.010182572	4.491017964	7.628233231	-21.07
98153	56.35	2.138025222	5.022754087	6.359753204	-22.41
70000	49.7	2.097955138	11.80124224	1.87416332	-21.99

### 5.5.2 การตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้กับผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution)

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ เมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงพบว่าแนวโน้มของค่า  $Nu$  มีค่าเพิ่มขึ้นและค่าตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลงที่เลขเรย์โนลด์มากขึ้น ตามลำดับและผลเฉลยแม่นยำตรงของค่าการถ่ายเท

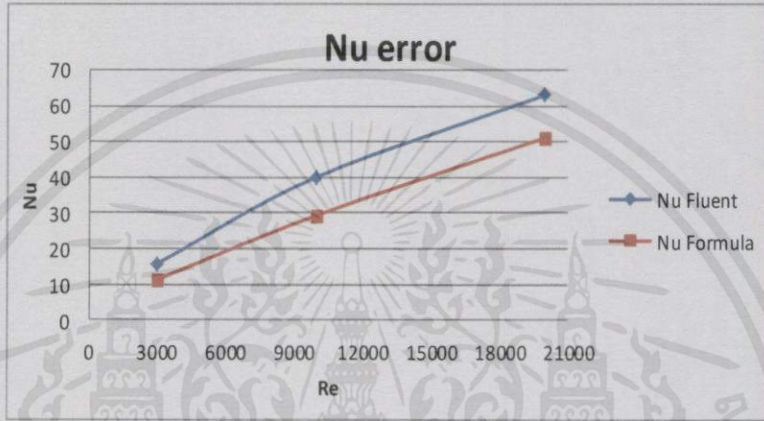
ความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมโดยมีฟังก์ชันค่าความไม่แน่นอนที่ผิวคงที่ กำหนดโดย จาก Webb and Kim, J.F. (2005) เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลเฉลยแม่นยำตรงของ Dittus-Boelter

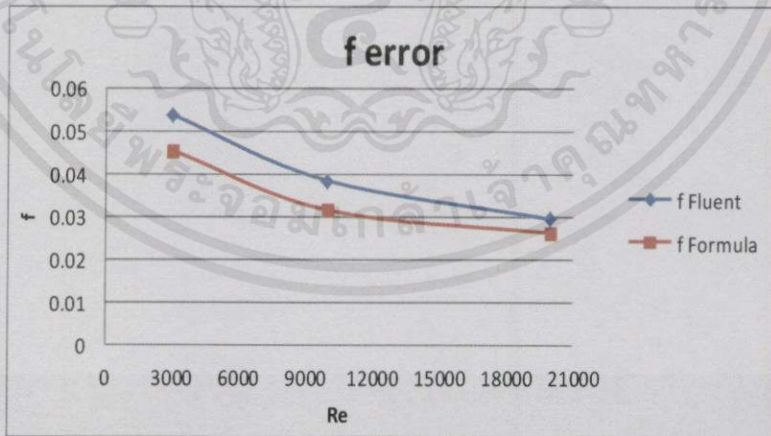
$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \text{ สำหรับ } Re \geq 10,000$$

ผลเฉลยแม่นยำตรงของ Blasius

$$f_0 = 0.079 Re^{-0.25} \text{ สำหรับ } Re \geq 20,000 \quad f_0 = 0.046 Re^{-0.2} \text{ สำหรับ } Re \leq 20,000$$



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่า  $Nu$  ของท่อกลมผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับผลที่ได้จากการจำลอง

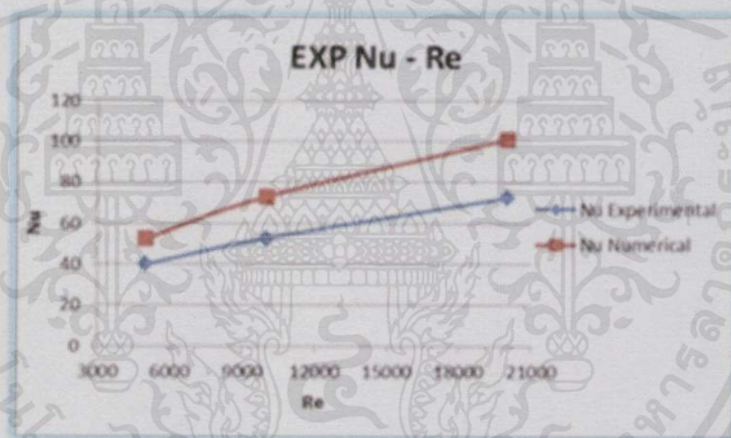


รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบค่าตัว  $f$  ของท่อกลมผิวเรียบระหว่างผลเฉลยแม่นยำตรงกับค่าที่ได้จากการ

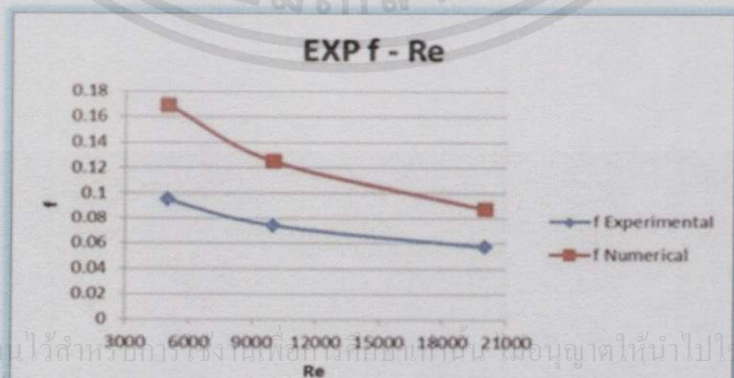
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.5.3 การพิสูจน์ความถูกต้อง

เนื่องจากผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นค่าที่ได้จากการประมาณเท่านั้น มีโอกาสที่การคำนวณจะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ การนำโปรแกรมมาใช้งานต้องมีการตรวจสอบโปรแกรมว่าให้ผลเฉลยถูกต้องหรือไม่ ซึ่งการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้ในการทำงานวิจัยนี้จะนำผลการทดลองของ Bas, Ozceyhan (2012) มาเปรียบเทียบความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบผลของการจำลองพบว่าค่าที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเป็น 30% สำหรับค่าเลขนัสเซลและ 30% สำหรับค่าตัวประกอบความเสียหายของการทดสอบการจำลองการไหลของอากาศผ่านแผ่นบิต สำหรับการสร้างการไหลแบบปั่นป่วน ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และ 5.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยอื่นเป็นอย่างดี ทำให้เป็นที่ยืนยันได้ว่าแบบจำลองการไหล 3 มิติ รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้พื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมสามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการคำนวณเพื่อวิเคราะห์ปัญหาการไหลในการถ่ายเทความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ได้



รูปที่ 5.8 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของค่า  $Nu$



รูปที่ 5.9 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของค่า  $f$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรวิจัยในชื่อของสภามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โครงสร้างการไหล, พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและความดัน ตกคร่อมของแผ่นบิต

### 6.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมสำหรับแผ่นบิตที่มีการติดตั้งภายในท่อกลมซึ่งจะพิจารณาในส่วนของอิทธิพลของ  $Re$ ,  $TR$ ,  $LR$ ,  $WR$  โดยแสดงผลจากการศึกษาด้วยรูปภาพซึ่งแสดงพฤติกรรมการไหลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมพร้อมทั้งวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อน, ค่าความดันตกคร่อมและค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยค่าของการถ่ายเทความร้อนจะแสดงในรูปของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซล ( $Nu/Nu_0$ ) , ค่าของความดันตกคร่อมจะแสดงอัตราส่วนความเสียดทาน ( $f/f_0$ ) และค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ( $TEF$ ) การแสดงผลดังกล่าวจะช่วยให้อธิบายการไหลที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน เมื่อมีการติดตั้งแผ่นบิตภายในท่อ

### 6.2 โครงสร้างการไหลของแผ่นบิต

โดยทั่วไปโครงสร้างการไหลของแผ่นบิตที่ติดตั้งในท่อกลมนั้น จะเป็นการไหลแบบหมุนวนไปตามความยาวของแผ่นบิต การไหลหมุนวนจะทำให้เกิดการกระแทกประหว่งของไหลกับผนังท่อ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นและยังสามารถทำให้ผสมผสานของอุณหภูมิได้ดีขึ้น

### 6.3 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์

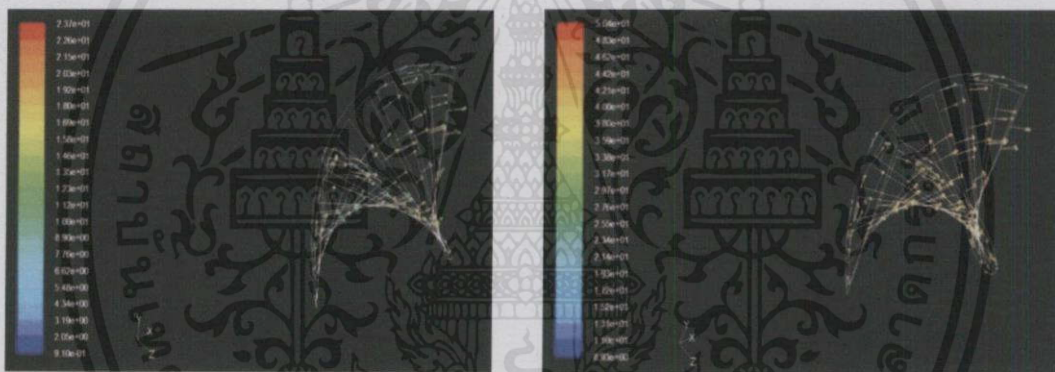
ในส่วนของอิทธิพลของ  $Re$  ได้นำเสนอกรณีศึกษาตัวอย่างใน 4 แบบได้แก่ กรณีศึกษาพื้นฐาน (Basic Case),  $TR = 2$ ,  $LR = 11.14$ ,  $WR = 5.71$  ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ มีทิศทางการไหลในท่อกลม โดยมีการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ  $Re$  โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมการไหลแบบ 3 มิติ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านของแผ่นบิต ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบจัดขวางการไหล, การกระจาย  $Nu$  บริเวณผิวท่อและแสดงค่าการถ่ายเทความร้อน ในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซล ( $Nu/Nu_0$ ) ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ เพื่อช่วยให้ อธิบายเข้าใจยิ่งขึ้น ส่วนที่ 3 นำเสนอในส่วนของความดันตกคร่อมหรือค่าความดันสูญเสียจากกรณีของไหลไหลผ่านแผ่นบิตเจาะรูที่ค่า  $Re$  ต่างๆ และส่วนที่ 4 นำเสนอค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่าย

ความร้อนซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีได้อย่างชัดเจน

### 6.3.1) Basic case (กรณีศึกษาขั้นพื้นฐาน)

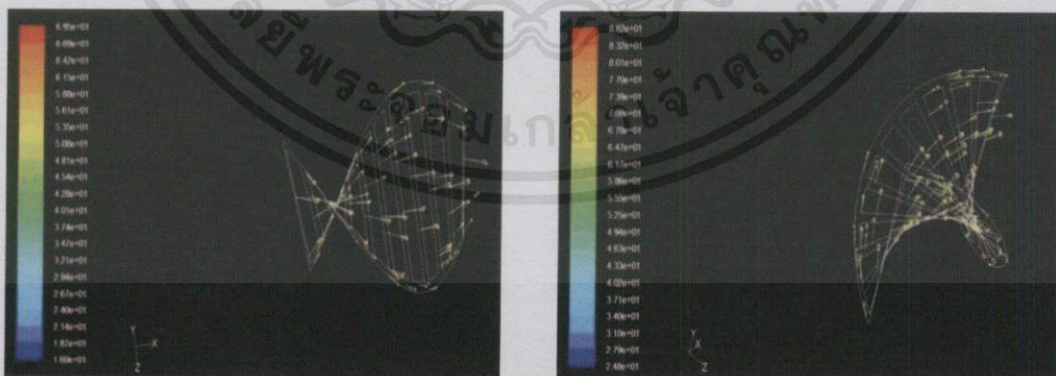
#### 6.3.1.1 เส้นกระแสการไหล

ในส่วนของเส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปของเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางการไหลเพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลโดยทั่วไปของการไหลผ่านแผ่นบิตเจาะรูโดยทำการพล็อตเปรียบเทียบในตำแหน่งของระนาบเดียวกันที่ค่า  $Re$  ต่างๆ ซึ่งจะช่วยในการอธิบายการหมุนวนที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นบิตเจาะรูในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.1 สำหรับโครงสร้างการไหลจะทำการพิจารณาเส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลสำหรับ  $Re = 3000, 7000, 10000, 13000, 17000, 20000$



(ก)

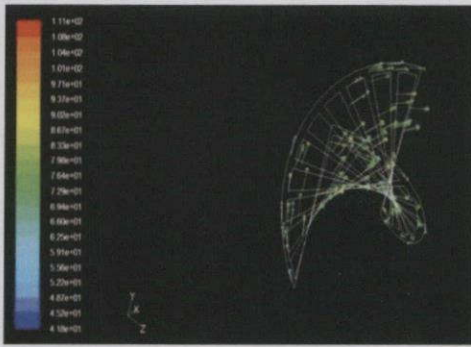
(ข)



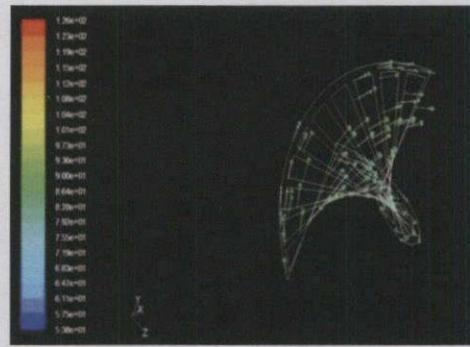
(ค)

(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)



(ฉ)

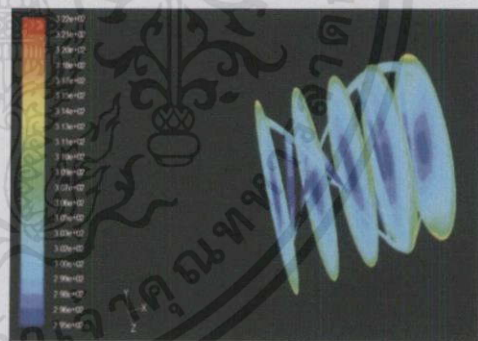
รูปที่ 6.1 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล กรณีศึกษาพื้นฐาน (Basic Case) สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 7000$  (ค)  $Re = 10000$  (ง)  $Re = 13000$  (จ)  $Re = 17000$  และ (ฉ)  $Re = 20000$

### 6.3.1.2 การถ่ายเทความร้อน

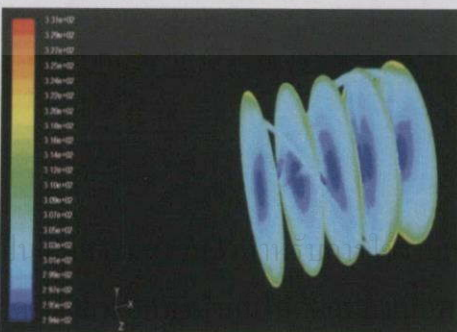
ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 6.2, การกระจาย  $Nu$  ที่บริเวณผิวท่อตั้งรูปที่ 6.3, และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลตั้งรูปที่ 6.4 ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ



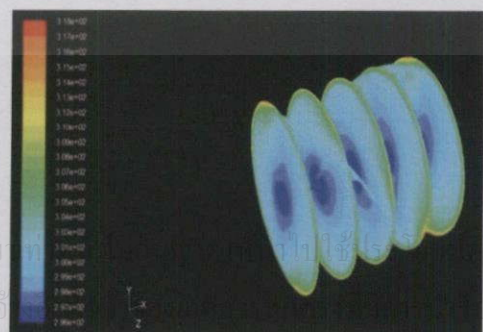
(ก)



(ข)



(ค)

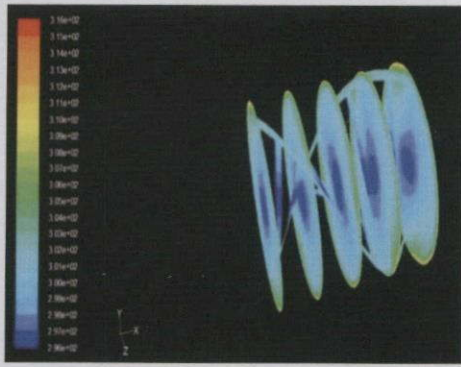


(ง)

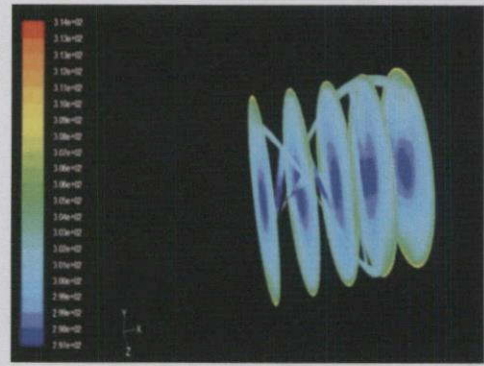
เอกสารนี้  
ไม่ว่ากรณี

เพื่อการศึกษ  
และต้องอ

ที่ใช้ประ  
งานการค้ำ  
ใช้



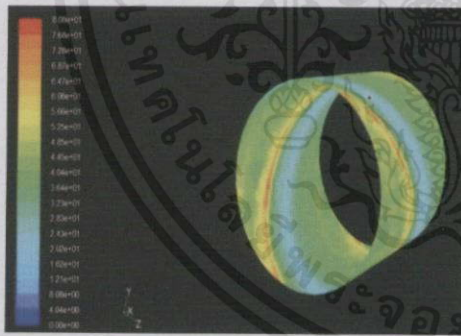
(ก)



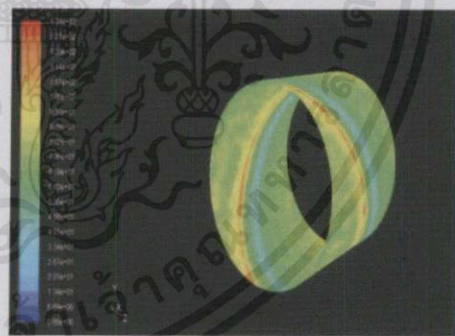
(ข)

รูปที่ 6.2 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหล กรณีศึกษาพื้นฐาน (Basic Case) สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 7000$  (ค)  $Re = 10000$  (ง)  $Re = 13000$  (จ)  $Re = 17000$  และ (ฉ)  $Re = 20000$

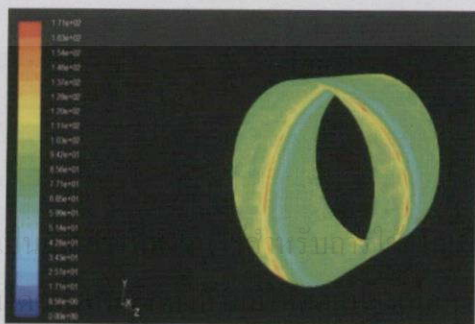
เมื่อพิจารณาค่าการกระจายอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลของรูปที่ 6.2 พบว่าเมื่อ  $Re$  มีค่าเพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากชั้นสีซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ บนระนาบขวางทางไหลคือที่  $Re$  เพิ่มขึ้น พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณที่มีสีน้ำเงินมีการขยายออกซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิภายในที่อ่อนแอลง



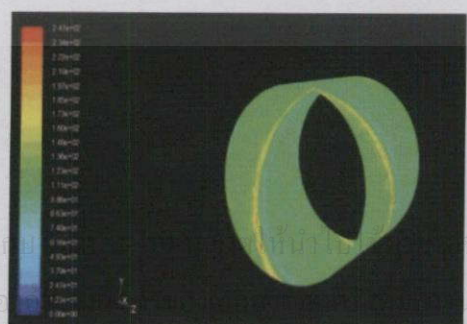
(ค)



(ข)



(จ)

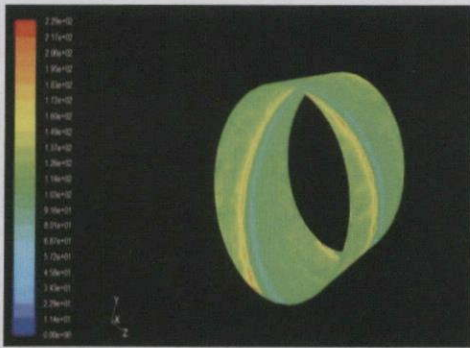


(ฉ)

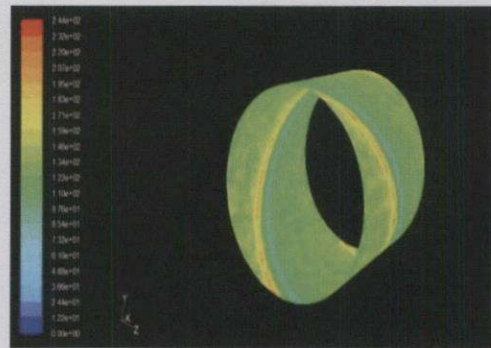
เอกสารนี้  
ไม่ว่ากรณี

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับปรากฏการณ์การไหลปั่นป่วนและการกระจายตัวของอุณหภูมิในท่อที่มีการไหลปั่นป่วน การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในท่อที่มีการไหลปั่นป่วนจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของเลขเรย์โนลด์ส (Re) และค่าของเลขพรันด์ทอล (Pr) การศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในท่อที่มีการไหลปั่นป่วนจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของเลขเรย์โนลด์ส (Re) และค่าของเลขพรันด์ทอล (Pr) การศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในท่อที่มีการไหลปั่นป่วนจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของเลขเรย์โนลด์ส (Re) และค่าของเลขพรันด์ทอล (Pr)

ทางด้านการศึกษา  
ไปใช้



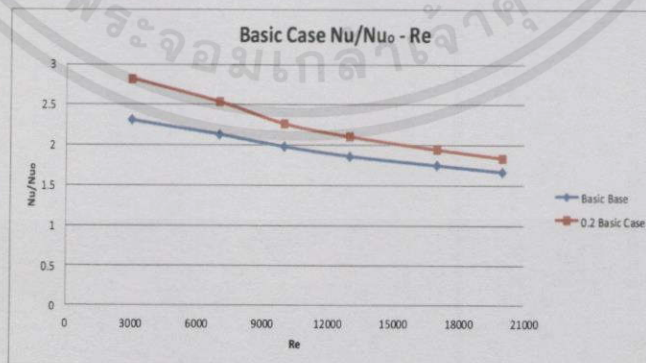
(จ)



(ฉ)

รูปที่ 6.3 การกระจาย  $Nu$  บนระนาบวงกลมไหล กรณีศึกษาพื้นฐาน (Basic Case) สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 7000$  (ค)  $Re = 10000$  (ง)  $Re = 13000$  (จ)  $Re = 17000$  และ (ฉ)  $Re = 20000$

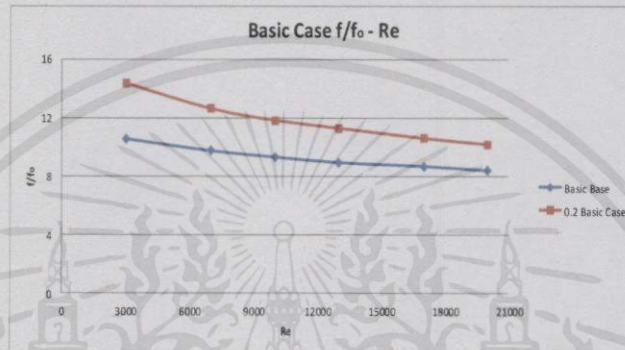
ในรูปที่ 6.3 แสดงการกระจาย  $Nu$  บริเวณผิวท่อที่กรณีศึกษา สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 7000$  (ค)  $Re = 10000$  (ง)  $Re = 13000$  (จ)  $Re = 17000$  และ (ฉ)  $Re = 20000$  ตามลำดับ ในบริเวณที่มีค่า  $Nu$  ต่ำที่ผิวท่อจะแสดงผลเป็นบริเวณที่มีสีฟ้าหมายถึงบริเวณนั้นมีค่าการถ่ายเทความร้อนน้อย ส่วนบริเวณที่มีค่า  $Nu$  สูงซึ่งหมายถึงบริเวณนั้นมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงจะแสดงผลเป็นสีเขียว สีเหลือง จะพบว่าเมื่อ  $Re$  สูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิภายในท่อมีค่ามากขึ้นโดยสังเกตได้จากการกระจายตัวของ  $Nu$  โดยที่  $Re = 3000$  บริเวณด้านหน้าและหลังแผ่นปิดจะมีสีเขียวและสีฟ้า จากนั้นเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้น สีจึงค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีเขียวและสีเหลืองมากขึ้นที่  $Re = 20000$  ดังนั้นเมื่อเพิ่ม  $Re$  จะส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวท่อดีขึ้น



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu / Nu_0$  กับ  $Re$  กรณีการติดตั้งแผ่นปิดเจาะรู ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ สำหรับกรณีศึกษาพื้นฐาน (Basic Case) เมื่อค่า  $Re$  หรือ อัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้  $Nu / Nu_0$  หรืออัตราการถ่ายเทความร้อนภายในท่อเมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าพบว่ามีค่าลดลง

### 6.3.1.3 ความดันตกคร่อม

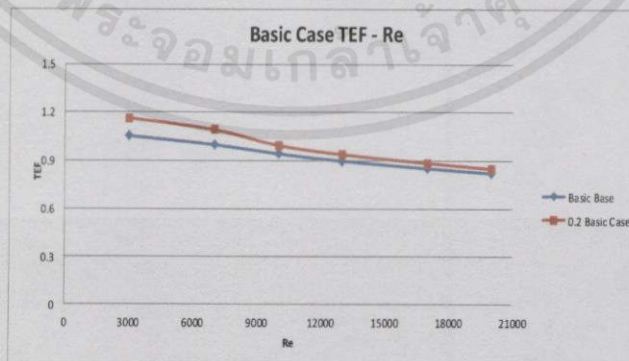
ในส่วนของการพิจารณาค่าความดันตกคร่อมจะนำเสนอในรูปของค่าที่ได้จากกรณีที่ทำ การเพิ่มแผ่นปิดเจาะรูกับค่าของท่อเปล่า แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  ในรูป ที่ 6.5 พบว่าเมื่อค่า  $Re$  หรืออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้  $f/f_0$  หรือ ค่าความดันตกคร่อม ลดลงด้วยซึ่งแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นปิดเจาะรู

### 6.3.1.4 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  กับ  $Re$  กรณีศึกษาพื้นฐาน พบว่าเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่า  $TEF$  มีค่าลดลงด้วยทำให้ค่า  $TEF$  ต่ำสุดเกิดที่  $Re = 20000$  ซึ่งเป็น  $Re$  สูงสุดที่ได้ทำการศึกษา โดยแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  กับ  $Re$  กรณีศึกษาพื้นฐาน (Basic Case)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.3.2 อัตราส่วนการบิดเท่ากับ 2

### 6.3.2.1 เส้นกระแสการไหล

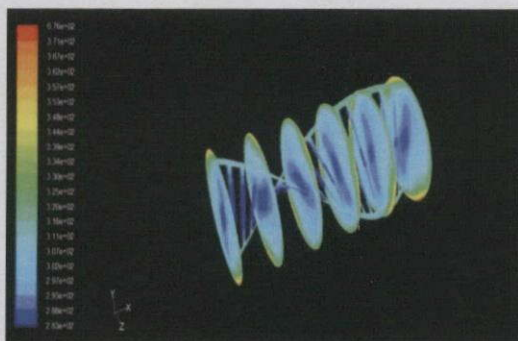
ในส่วนของเส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปของเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางการไหลเพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลโดยทั่วไปของการไหลผ่านแผ่นบิดเจาะรูโดยทำการพล็อตเปรียบเทียบในตำแหน่งของระนาบเดียวกันที่ค่า  $Re$  ต่างๆ ซึ่งจะช่วยในการอธิบายการหมุนวนที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นบิดเจาะรูในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.7 สำหรับโครงสร้างการไหลจะทำการพิจารณาเส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลสำหรับ  $Re = 3000, 10000, 20000$



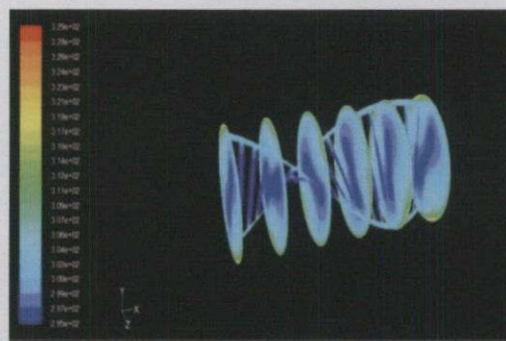
รูปที่ 6.7 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล กรณีแผ่นบิดที่เจาะรูสี่เหลี่ยม  $TR = 2$   
(ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 10000$  (ค)  $Re = 20000$

### 6.3.2.2 การถ่ายเทความร้อน

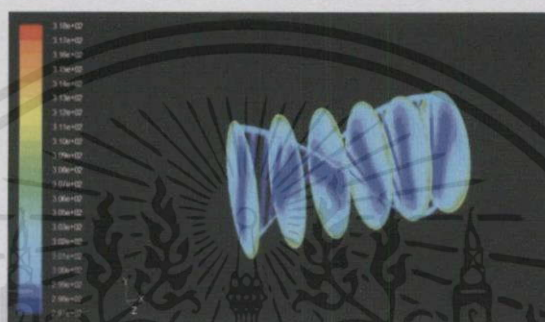
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 6.8, การกระจาย  $Nu$  ที่บริเวณผิวท่อดังรูปที่ 6.9 และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลดังรูปที่ 6.10 ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ



(ก)



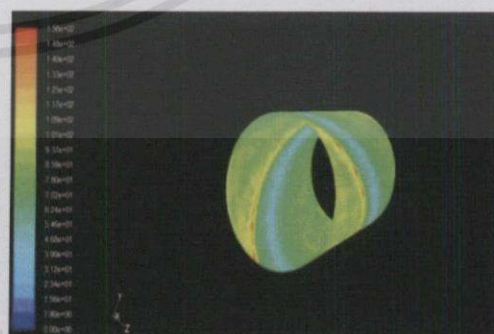
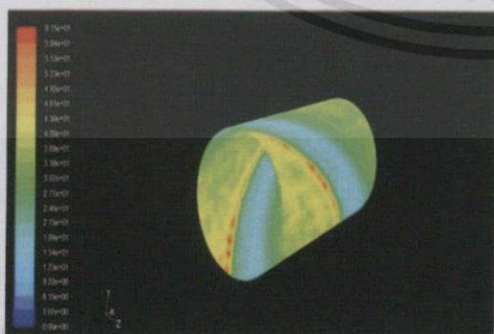
(ข)



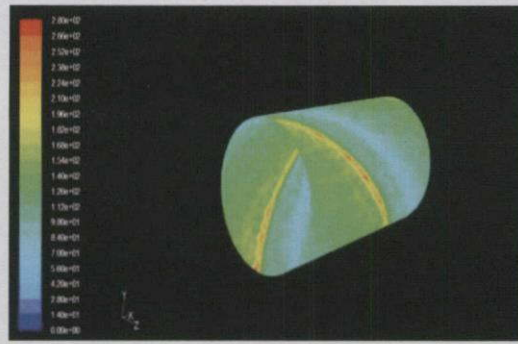
(ค)

รูปที่ 6.8 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิดที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $TR = 2$   
 สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 10000$  (ค)  $Re = 20000$

เมื่อพิจารณาค่าการกระจายอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลของรูป 6.8 พบว่าเมื่อ  $Re$  มีค่าเพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากชั้นสีซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ บนระนาบขวางทางไหล คือที่  $Re$  เพิ่มขึ้น พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณที่มีสีน้ำเงินมีการขยายออก ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิภายในท่อนั้นลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการที่เก็บค่าลิขสิทธิ์ ซึ่งผู้จัดทำเอกสารนี้ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัด (ก) ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร (ข) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

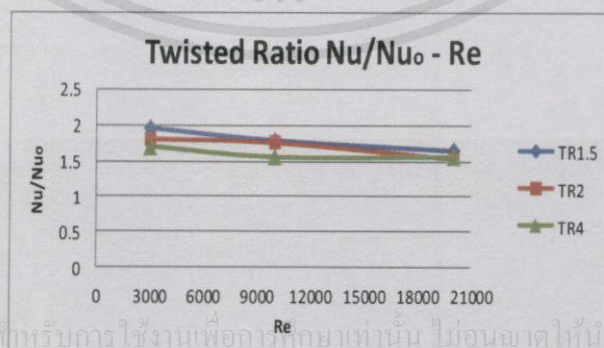


(ค)

รูปที่ 6.9 การกระจาย  $Nu$  บนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิดที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $TR = 2$  สำหรับ  
(ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 10000$  (ค)  $Re = 20000$

ในรูปที่ 6.9 แสดงการกระจาย  $Nu$  บริเวณผิวท่อที่กรณีศึกษา สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 10000$  และ (ค)  $Re = 20000$  ตามลำดับ ในบริเวณที่มีค่า  $Nu$  ต่ำที่ผิวท่อจะแสดงผลเป็นบริเวณที่มีสีฟ้าหมายถึงบริเวณนั้น มีค่าการถ่ายเทความร้อนน้อย ส่วนบริเวณที่มีค่า  $Nu$  สูงซึ่งหมายถึงบริเวณนั้นมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงจะแสดงผลเป็นสีเขียว สีเหลือง จะพบว่าเมื่อ  $Re$  สูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิภายในท่อมีค่ามากขึ้นโดยสังเกตได้จากการกระจายตัวของ  $Nu$  โดยที่  $Re = 3000$  บริเวณด้านหน้าและหลังแผ่นบิดจะมีสีเขียวและสีฟ้า จากนั้นเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้น สีจึงค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีเขียวและสีเหลืองมากขึ้นที่  $Re = 20000$  ดังนั้นเมื่อเพิ่ม  $Re$  จะส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวท่อดีขึ้น

จากรูปที่ 6.10 จะพบว่าเมื่อ  $Re$  มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้นโดยที่  $Re$  ในช่วง  $3000 - 10000$  ที่ค่า  $TR$  ต่าง ๆ กันจะให้  $Nu/Nu_0$  ที่ใกล้เคียงกัน แต่  $Re$  หลังจาก  $10000 - 20000$   $TR = 1.5$  จะให้  $Nu/Nu_0$  มากกว่า  $TR = 2$  และ  $TR = 4$  ซึ่งหมายความว่าค่า  $TR$  ที่น้อยกว่าจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ต่ำกว่า



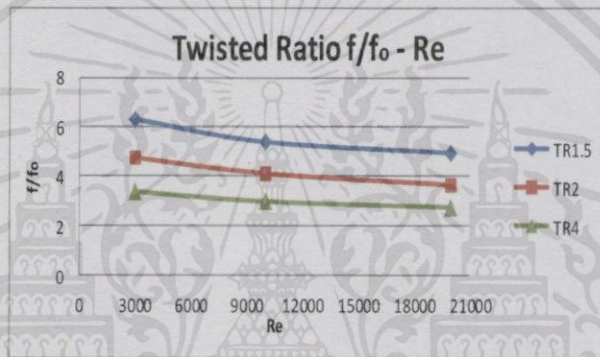
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu/Nu_0$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นบิดที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $TR$  ต่างๆ

### 6.3.2.2 ความดันตกคร่อม

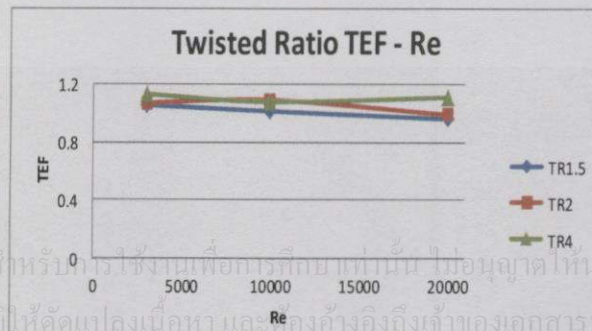
ในส่วนของการพิจารณาค่าความดันตกคร่อมจะนำเสนอในรูปของค่า  $f$  ที่ได้จากกรณีที่ทำกรเพิ่มแผ่นบิดเจาะรูกับ  $f_0$  ของท่อเปล่า แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  ในรูปที่ 6.11 พบว่าเมื่อค่า  $Re$  หรืออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้  $f/f_0$  หรือ ค่าความดันตกคร่อมลดลงด้วยซึ่งแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันโดยที่ค่า  $TR$  ที่มากกว่าจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมที่น้อยกว่า



รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นบิดเจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $TR$  ต่างๆ

### 6.3.2.4 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  กับ  $Re$  กรณี  $TR$  พบว่าเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่า  $TEF$  มีค่าลดลงด้วยทำให้ค่า  $TEF$  ต่ำสุดเกิดที่  $Re = 20000$  ซึ่งเป็น  $Re$  สูงสุดที่ได้ทำการศึกษา โดยแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันสำหรับทุกค่า  $TR$

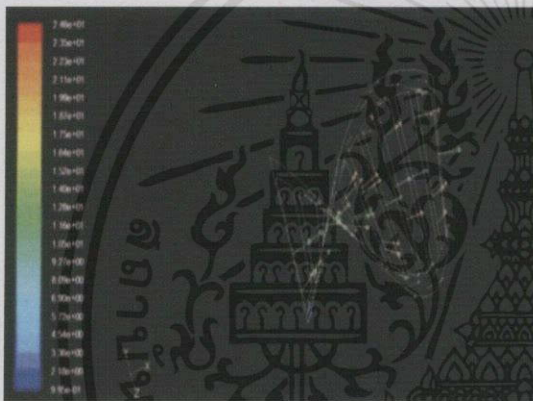


รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นบิดเจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $TR$  ต่างๆ

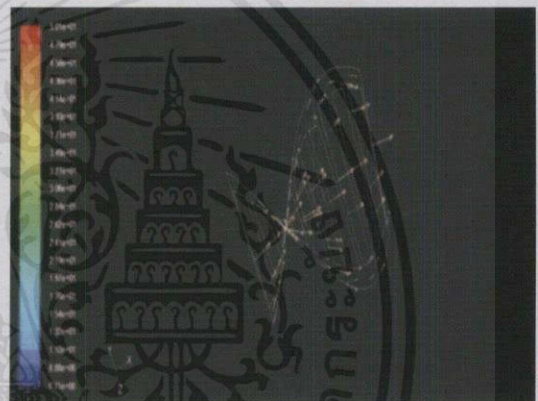
### 6.3.3 อัตราส่วนความยาวเท่ากับ 11.14

#### 6.3.3.1 เส้นกระแสการไหล

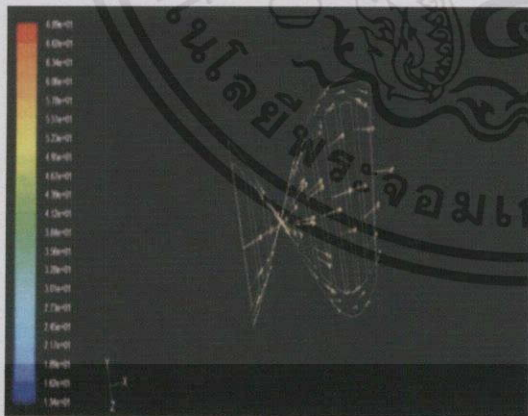
ในส่วน of เส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปของเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางการไหลเพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลโดยทั่วไปของการไหลผ่านแผ่นบิตเจาะรูโดยทำการพล็อตเปรียบเทียบในตำแหน่งของระนาบเดียวกันที่ค่า  $Re$  ต่างๆ ซึ่งจะช่วยในการอธิบายการหมุนวนที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นบิตเจาะรูในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.13 สำหรับโครงสร้างการไหลจะทำการพิจารณาเส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลสำหรับ  $Re = 3000, 7000, 10000, 13000, 17000, 20000$



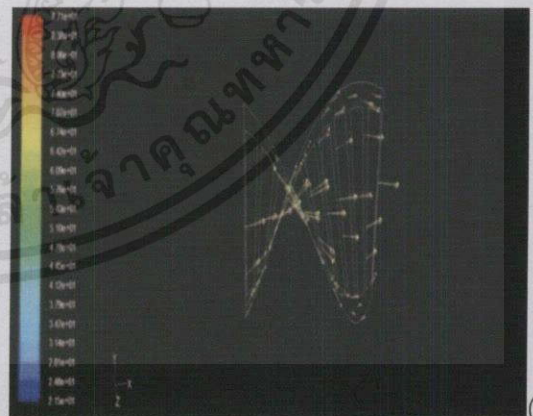
(ก)



(ข)

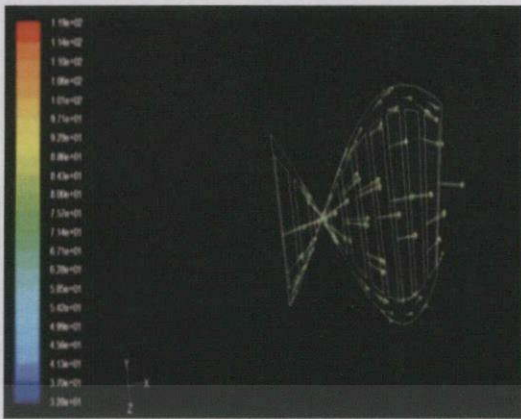


(ค)

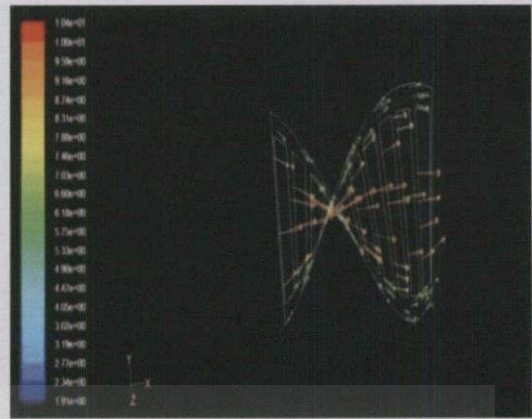


(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

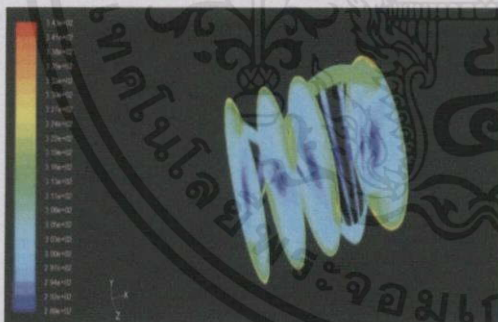


(ฉ)

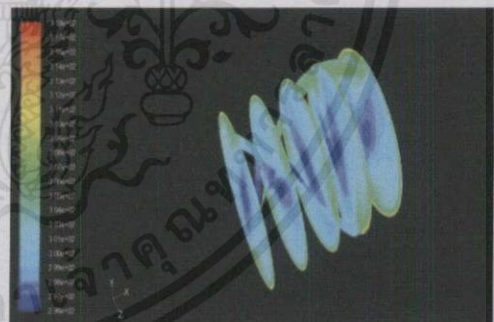
รูปที่ 6.13 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล กรณีแผ่นบิดที่เจาะรูที่  $LR = 11.14$  (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 7000$  (ค)  $Re = 10000$  (ง)  $Re = 13000$  (จ)  $Re = 17000$  และ (ฉ)  $Re = 20000$

### 6.3.3.2 การถ่ายเทความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 6.14, การกระจาย  $Nu$  ที่บริเวณผิวท่อดังรูปที่ 6.15 และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลดังรูปที่ 6.16 ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ



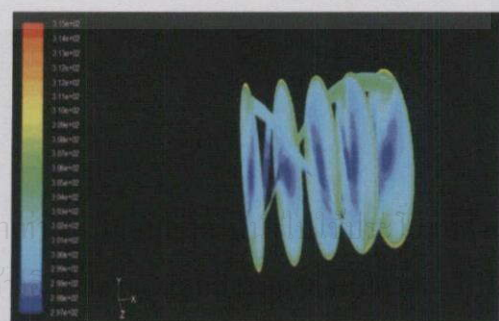
(ก)



(ข)

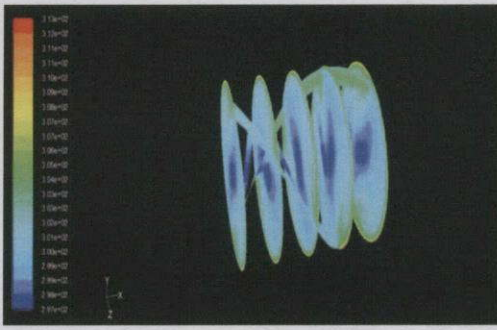


(ค)

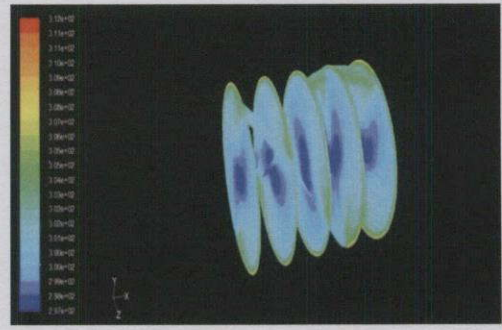


(ง)

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การคัดลอกโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย



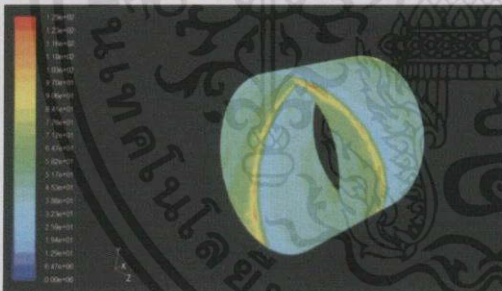
(จ)



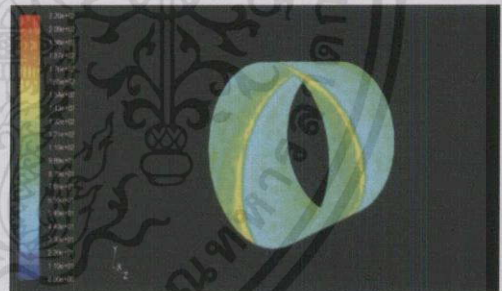
(ฉ)

รูปที่ 6.14 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นปิดเจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $LR = 11.14$  สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 7000$  (ค)  $Re = 10000$  (ง)  $Re = 13000$  (จ)  $Re = 17000$  และ (ฉ)  $Re = 20000$

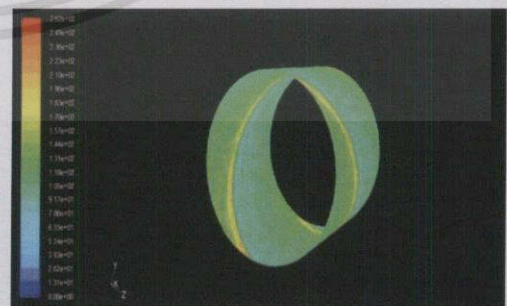
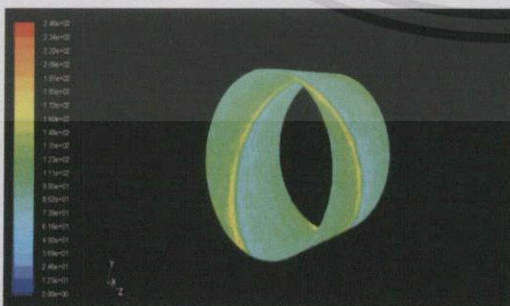
เมื่อพิจารณาค่าการกระจายอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลของรูปที่ 6.14 พบว่าเมื่อ  $Re$  มีค่าเพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากชั้นสีซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ บนระนาบขวางทางไหล คือที่  $Re$  เพิ่มขึ้น พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณที่มีสีน้ำเงินมีการขยายออก ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิภายในท่อนั้นลดลง



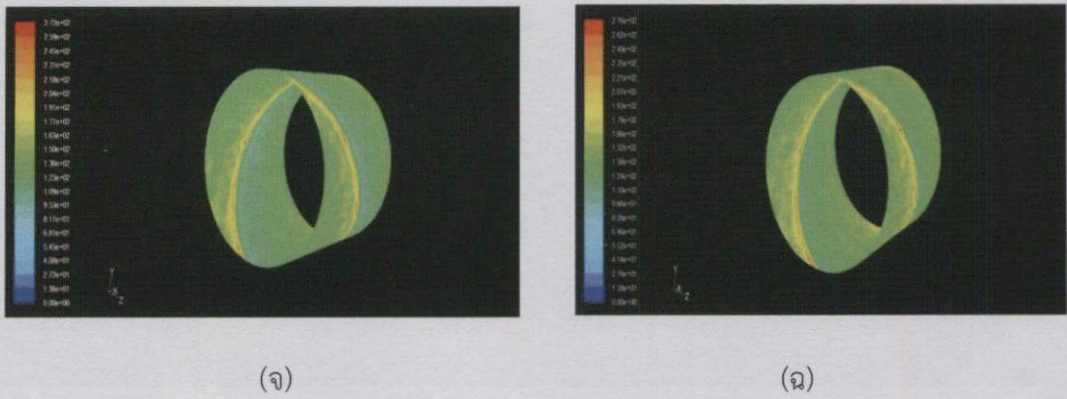
(ก)



(ข)

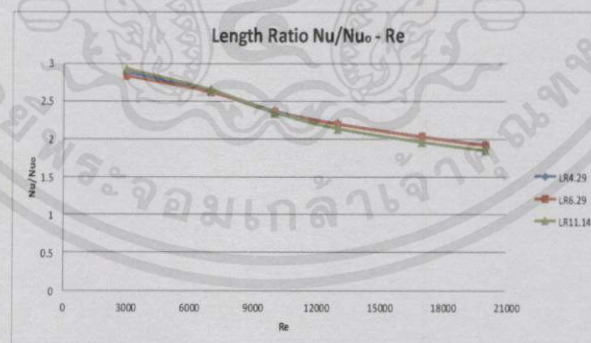


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ ใช้นชานการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิ (ค) แปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร (ง) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.15 การกระจาย  $Nu$  บนระนาบขวางการไหล กรณี  $LR = 11.14$ . สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 7000$  (ค)  $Re = 10000$  (ง)  $Re = 13000$  (จ)  $Re = 17000$  และ (ฉ)  $Re = 20000$

ในรูปที่ 6.15 แสดงการกระจาย  $Nu$  บริเวณผิวท่อที่กรณีศึกษา สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 7000$  (ค)  $Re = 10000$  (ง)  $Re = 13000$  (จ)  $Re = 17000$  และ (ฉ)  $Re = 20000$  ตามลำดับ ในบริเวณที่มีค่า  $Nu$  ต่ำที่ผิวท่อจะแสดงผลเป็นบริเวณที่มีสีฟ้าหมายถึงบริเวณนั้น มีค่าการถ่ายเทความร้อนน้อย ส่วนบริเวณที่มีค่า  $Nu$  สูงซึ่งหมายถึงบริเวณนั้นมีค่าถ่ายเทความร้อนสูงจะแสดงผลเป็นสีเขียว สีเหลือง จะพบว่าเมื่อ  $Re$  สูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิภายในท่อมักมากขึ้นโดยสังเกตได้จากการกระจายตัวของ  $Nu$  โดยที่  $Re = 3000$  บริเวณด้านหน้าและหลังแผ่นบิตจะมีสีเขียวและสีฟ้า จากนั้นเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้น สีจึงค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีเขียวและสีเหลืองมากขึ้นที่  $Re = 20000$  ดังนั้นเมื่อเพิ่ม  $Re$  จะส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวท่อดีขึ้น

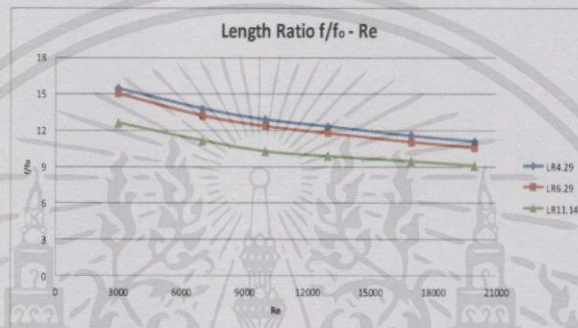


รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu / Nu_0$  กับ  $Re$  กรณีการติดตั้งแผ่นบิตเจาะรูที่  $LR$  ต่างๆ

จากรูปที่ 6.16 สำหรับกรณีของ  $LR$  ที่  $Re = 20000$  ที่ให้ค่า  $Nu / Nu_0$  น้อยกว่าที่  $Re = 3000$  เท่ากับ  $23.00 - 30.00\%$  เมื่อพิจารณาที่  $LR$  เดียวกัน โดยที่  $Re = 3000$  จะมี  $Nu / Nu_0$  น้อยกว่ากรณีมากที่สุด เท่ากับ  $1.59 - 1.69$  และที่ค่า  $Re = 20000$  มีค่า  $Nu / Nu_0$  น้อยที่สุด เท่ากับ  $1.52 -$

### 6.3.3.3 ความดันตกคร่อม

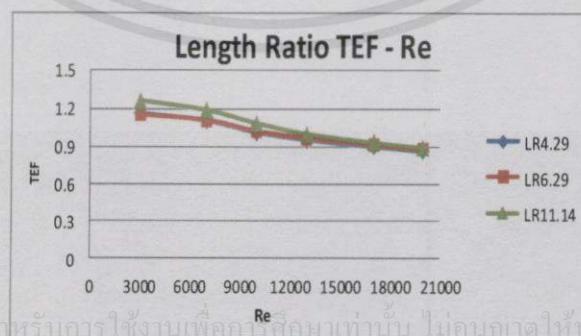
ในส่วนของการพิจารณาค่าความดันตกคร่อมจะนำเสนอในรูปของค่า  $f$  ที่ได้จากกรณี ที่ทำการเพิ่มแผ่นปิดเจาะรูกับ  $f_0$  ของท่อเปล่า แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  ในรูปที่ 6.17 พบว่าเมื่อค่า  $Re$  หรืออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้  $(f/f_0)$  หรือ ค่าความดันตกคร่อมลดลงด้วยซึ่งแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันโดยที่ค่า  $LR$  ที่มากกว่าจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมที่น้อยกว่า



รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นปิดเจาะรูที่  $LR$  ต่างๆ

### 6.3.3.3 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 6.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  กับ  $Re$  กรณี  $LR$  พบว่าเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่า  $TEF$  มีค่าลดลงด้วยทำให้ค่า  $TEF$  ต่ำสุดเกิดที่  $Re = 20000$  ซึ่งเป็น  $Re$  สูงสุดที่ได้ทำการศึกษา โดยแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันสำหรับทุกค่า  $LR$  และค่า  $LR$  เริ่มมีผลต่อประสิทธิภาพน้อยลงโดยสังเกตจากกราฟที่ลูเข้าทับกัน

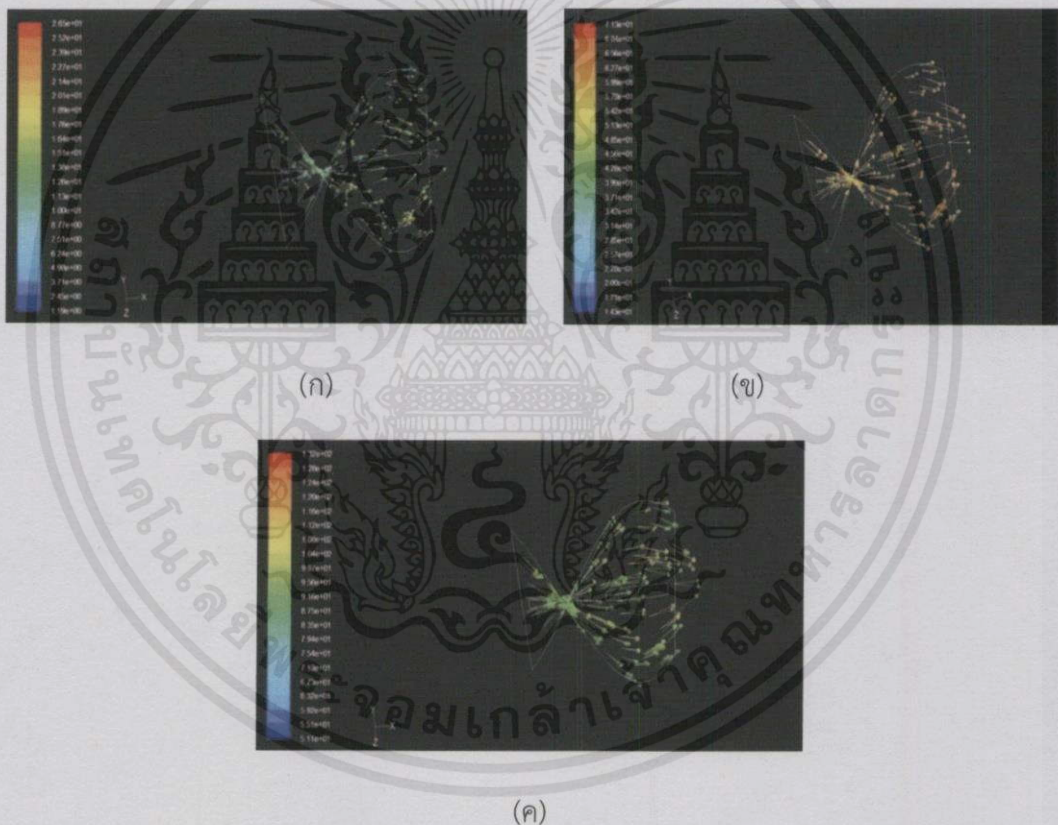


รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นปิดเจาะรูที่  $LR$  ต่างๆ

### 6.3.4) อัตราส่วนความกว้างเท่ากับ 5.71

#### 6.3.4.1 เส้นกระแสการไหล

ในส่วน of เส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูป of เส้นกระแสการไหลบนระนาบของการไหลเพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลโดยทั่วไปของการไหลผ่านแผ่นบิตเจาะรูโดยการพล็อตเปรียบเทียบในตำแหน่ง of ระบายเดียวกันที่ค่า  $Re$  ต่างๆ ซึ่งจะช่วยในการอธิบายการหมุนวนที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นบิตเจาะรูในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.19 สำหรับโครงสร้างการไหลจะทำการพิจารณาเส้นกระแสการไหลในระนาบของการไหลสำหรับ  $Re = 3000, 10000, 20000$



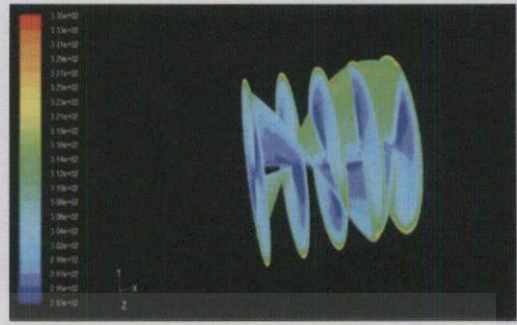
รูปที่ 6.19 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $WR = 5.71$  สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 10000$  (ค)  $Re = 20000$

#### 6.3.4.2 การถ่ายเทความร้อน

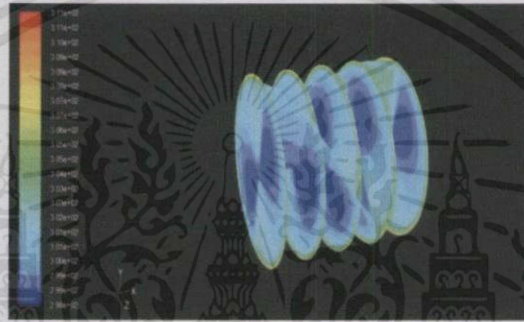
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบของการไหล ดังรูปที่ 6.20, การกระจาย  $Nu$  ที่บริเวณผิวท่อ ดังรูปที่ 6.21 และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลดังรูปที่ 6.22 ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ



(ก)



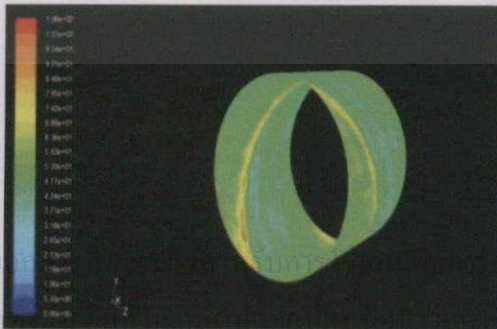
(ข)



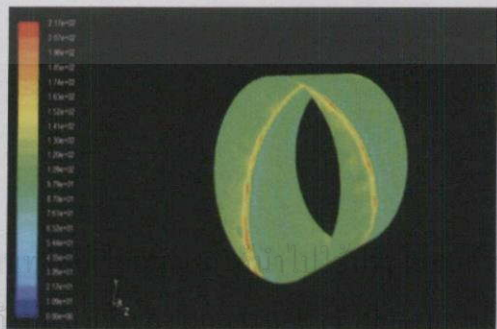
(ค)

รูปที่ 6.20 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิดเจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $WR = 5.71$  สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 10000$  (ค)  $Re = 20000$

เมื่อพิจารณาค่าการกระจายอุณหภูมิที่ระนาบขวางการไหลของรูปที่ 6.20 พบว่าเมื่อ  $Re$  มีค่าเพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากชั้นสีซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ บนระนาบขวางทางไหล คือที่  $Re$  เพิ่มขึ้น พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณที่มีสีน้ำเงินมีการขยายออก ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิภายในท่อนั้นลดลง

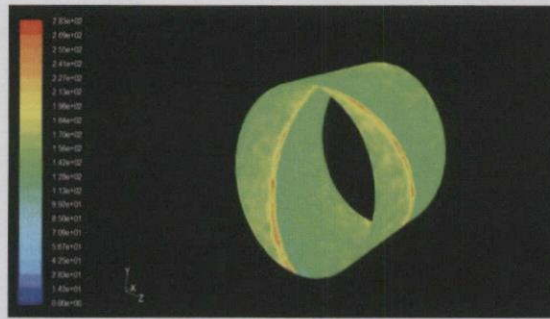


(ก)



(ข)

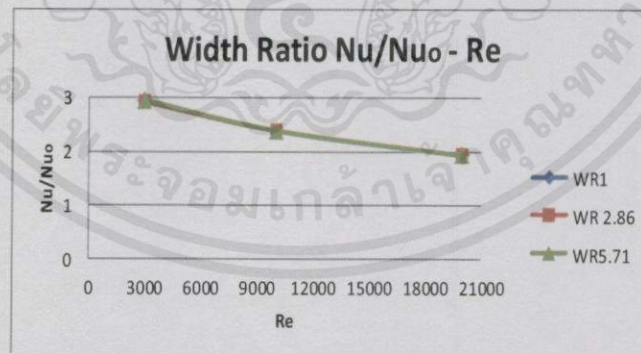
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การค้า



(ค)

รูปที่ 6.21 การกระจาย  $Nu$  บนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิดที่เจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $WR = 5.71$  สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 10000$  (ค)  $Re = 20000$

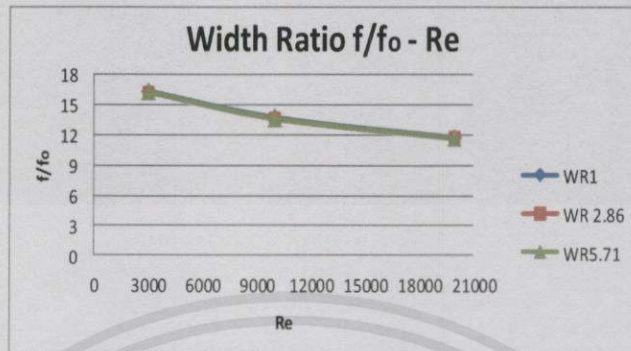
ในรูปที่ 6.21 แสดงการกระจาย  $Nu$  บริเวณผิวท่อที่กรณีศึกษา สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 10000$  (ค)  $Re = 20000$  ตามลำดับ ในบริเวณที่มีค่า  $Nu$  ต่ำที่ผิวท่อจะแสดงผลเป็นบริเวณที่มีสีฟ้าหมายถึงบริเวณนั้น มีค่าการถ่ายเทความร้อนน้อย ส่วนบริเวณที่มีค่า  $Nu$  สูงซึ่งหมายถึงบริเวณนั้นมีค่าถ่ายเทความร้อนสูงจะแสดงผลเป็นสีเขียว สีเหลือง จะพบว่าเมื่อ  $Re$  สูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิภายในท่อมักมากขึ้นโดยสังเกตได้จากการกระจายตัวของ  $Nu$  โดยที่  $Re = 3000$  บริเวณด้านหน้าและหลังแผ่นบิดจะมีสีเขียวและสีฟ้า จากนั้นเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้น สีจึงค่อยๆเปลี่ยนเป็นสีเขียวและสีเหลืองมากขึ้นที่  $Re = 20000$  ดังนั้นเมื่อเพิ่ม  $Re$  จะส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวท่อดีขึ้น



รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu/Nu_0$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นบิดเจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $WR$  ต่างๆ

จากรูปที่ 6.22 จะพบว่าเมื่อ  $Re$  มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงค่า  $WR$  ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ  $Nu/Nu_0$  ที่น้อยมาก

### 6.3.4.3 ความดันตกคร่อม

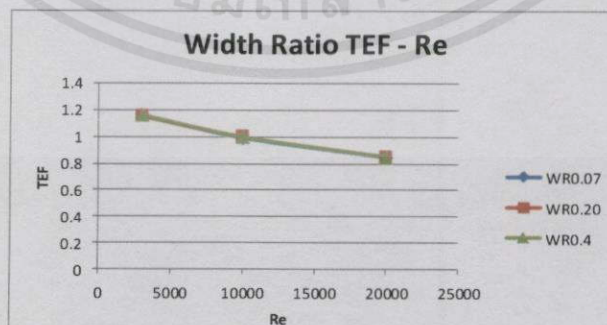


รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นบิดเจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $WR$  ต่างๆ

ในส่วนของการพิจารณาค่าความดันตกคร่อมจะนำเสนอในรูปของค่า  $f$  ที่ได้จากกรณีที่ทำการเพิ่มแผ่นบิดเจาะรูกับ  $f_0$  ของท่อเปล่า แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  ในรูปที่ 6.23 พบว่าเมื่อค่า  $Re$  หรืออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้  $f/f_0$  หรือ ค่าความดันตกคร่อมลดลงด้วยซึ่งแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันโดยที่  $WR$  ที่ค่าต่างๆกัน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันตกคร่อมที่น้อยมากจนแทบไม่มีผลเลย

### 6.3.4.4 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 6.24 พบว่าเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่า  $TEF$  เท่ากันโดยแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับสำหรับทุกค่า  $WR$  โดยที่  $WR$  ที่ค่าต่างๆกัน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันตกคร่อมที่น้อยมากจนแทบไม่มีผลเลย



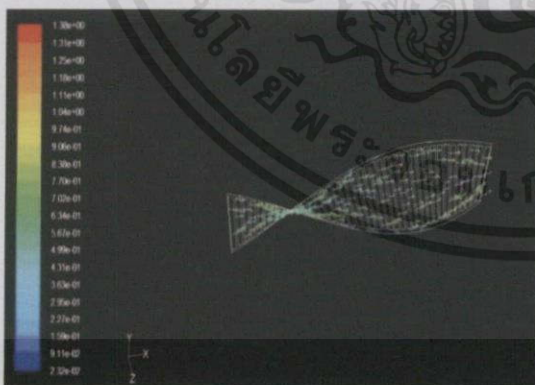
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งรูปที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นบิดเจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $WR$  ต่างๆ ไปใช้

## 6.4. อิทธิพลของอัตราส่วนการบิด

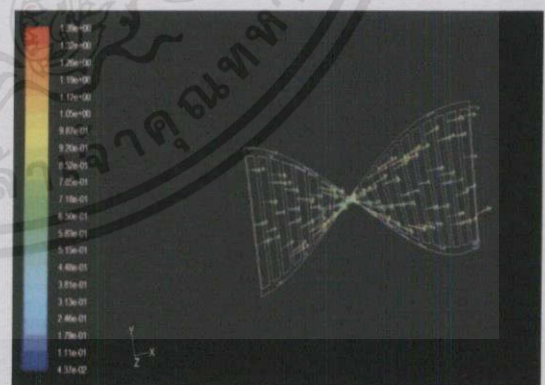
ในส่วนของอิทธิพลของ  $TR$  ได้นำเสนอกรณีศึกษาสำหรับ  $TR$  ทั้งหมด 3 ค่า 1.5, 2, 4 ในท่อกลม โดยมีการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ  $TR$  โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมการไหลแบบ 3 มิติ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านของแผ่นบิดเจาะรู ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบจัดขวางการไหล, การกระจาย  $Nu$  บริเวณผิวท่อ และแสดงค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซล ( $Nu / Nu_0$ ) ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ เพื่อช่วยให้อธิบายเข้าใจยิ่งขึ้น ส่วนที่ 3 นำเสนอในส่วนของความดันตกคร่อมหรือค่าความดันสูญเสียจากกรณีของไหลไหลผ่านแผ่นบิดเจาะรูที่ ค่า  $WR$  ต่างๆ และส่วนที่ 4 นำเสนอค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  ที่ค่า  $TR$  ต่างๆ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีได้อย่างชัดเจน

### 6.4.1 เส้นกระแสการไหล

ในส่วนของเส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปของเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางการไหล เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลโดยทั่วไปของการไหลผ่านแผ่นบิดเจาะรูโดยทำการพล็อตเปรียบเทียบในตำแหน่งของระนาบเดียวกันที่ค่า  $TR$  ต่างๆ ซึ่งจะช่วยในการอธิบายการหมุนวนที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นบิดเจาะรูในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.25 สำหรับโครงสร้างการไหลจะทำการพิจารณาเส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลสำหรับ  $TR = 1.5, 2, 4$

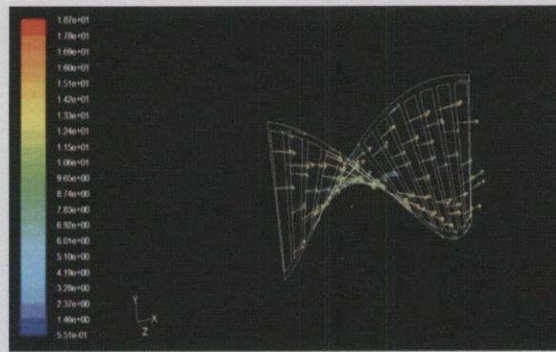


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

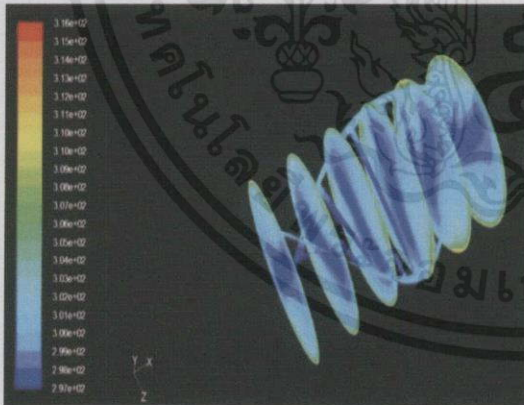


(ค)

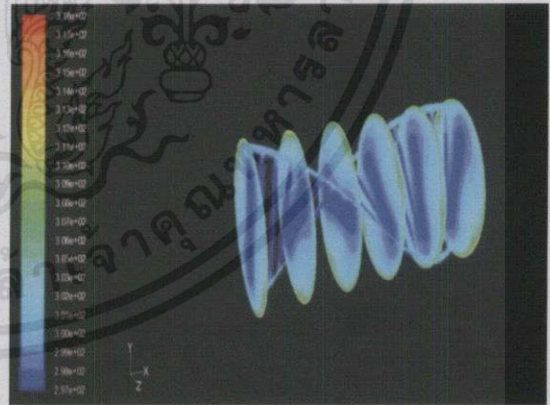
รูปที่ 6.25 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล ที่  $Re = 3000$  กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่  $TR$  ต่างๆ (ก)  $TR = 1.5$  (ข)  $TR = 2$  (ค)  $TR = 4$

### 6.4.2 การถ่ายเทความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 6.26, การกระจาย  $Nu$  ที่บริเวณผิวท่อดังรูปที่ 6.27 และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ดังรูปที่ 6.28 ที่ค่า  $TR$  ต่างๆ

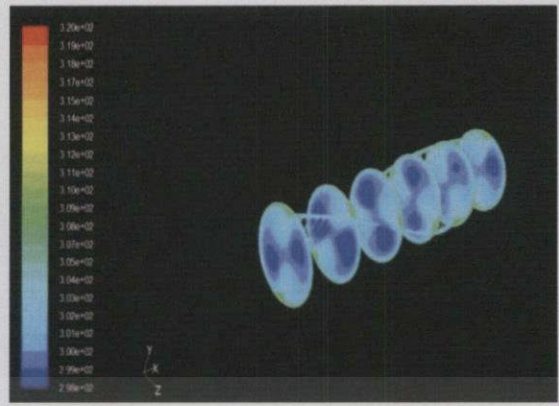


(ก)



(ข)

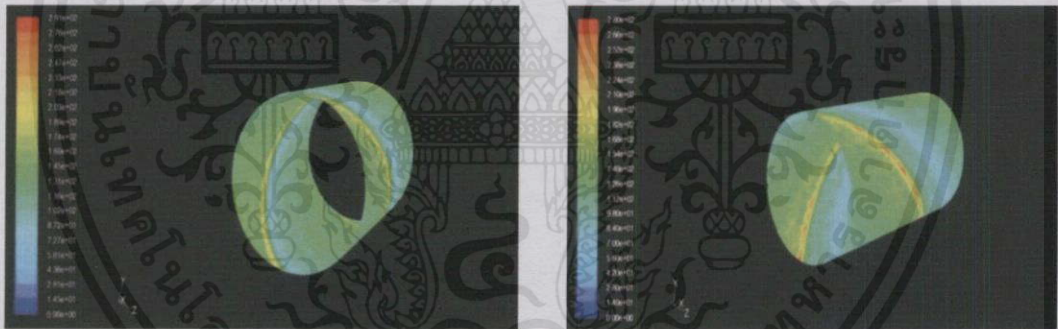
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

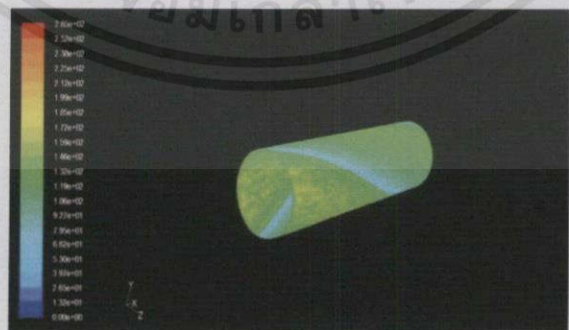
รูปที่ 6.26 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหลที่  $Re = 3000$  กรณีแผ่นบิดที่เจาะรูที่  $TR$  ต่างๆ (ก)  $TR = 1.5$  (ข)  $TR = 2$  (ค)  $TR = 4$

รูปที่ 6.26 เมื่อ  $TR$  มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าอุณหภูมิภายในท่อนั้นสูงขึ้นโดยสังเกตจากการกระจายตัวของพื้นที่สีน้ำเงินนั้นลดลง



(ก)

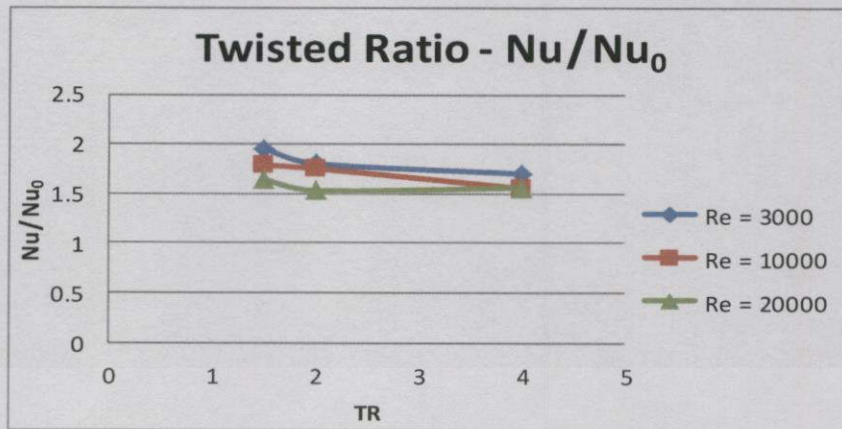
(ข)



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

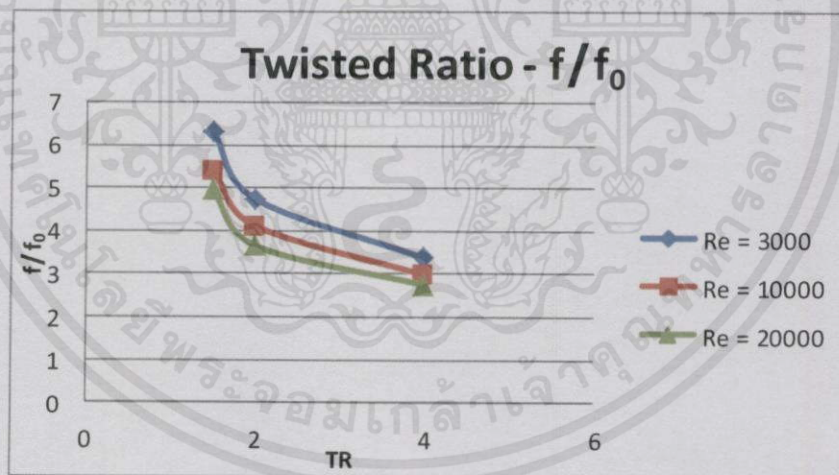
รูปที่ 6.27 การกระจาย  $Nu$  บนระนาบขวางการไหลที่กรณี  $Re = 3000$  กรณีแผ่นบิดที่เจาะรูที่  $TR$  ต่างๆ (ก)  $TR = 1.5$  (ข)  $TR = 2$  (ค)  $TR = 4$



รูปที่ 6.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu/Nu_0$  กับ  $Re$  กรณีการติดตั้งแผ่นบิดเจาะรูที่  $TR$  ต่างๆ

จากรูปที่ 6.28 จะพบว่าเมื่อ  $Re$  มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้นโดยที่  $Re$  ในช่วง 3000 - 10000 ที่ค่า  $TR$  ต่างๆกันจะให้  $Nu/Nu_0$  ที่ใกล้เคียงกัน แต่  $Re$  หลังจาก 10000 - 20000  $TR=1.5$  จะให้  $Nu/Nu_0$  มากกว่า  $TR=2$  และ  $TR=4$  ซึ่งหมายความว่าค่า  $TR$  ที่น้อยกว่าจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่า

#### 6.4.3 ความดันตกคร่อม



รูปที่ 6.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นบิดเจาะรูที่  $TR$  ต่างๆ

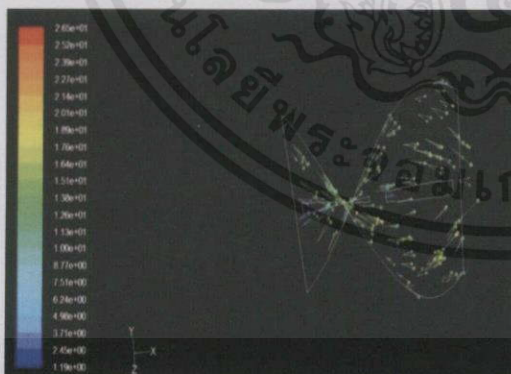
ในส่วนของการพิจารณาค่าความดันตกคร่อมจะนำเสนอในรูปของค่า  $f$  ที่ได้จากกรณีที่ทำกรเพิ่มแผ่นบิดเจาะรูกับ  $f_0$  ของท่อเปล่า แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  ในรูปที่ 6.29 พบว่าเมื่อค่า  $Re$  หรืออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้  $f/f_0$  หรือ ค่าความดันตกคร่อมลดลงด้วยซึ่งแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันโดยที่ค่า  $TR$  ที่มากกว่าจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมที่น้อยกว่า

## 6.5 อิทธิพลของอัตราส่วนความกว้าง

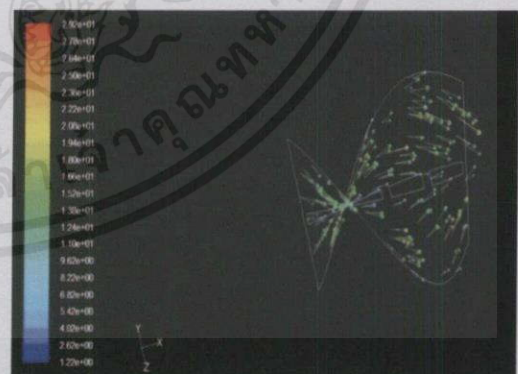
ในส่วนของอิทธิพลของ  $WR$  ได้นำเสนอกรณีศึกษาสำหรับ  $WR$  ทั้งหมด 3 ค่า 1, 2.86, 5.71 ในท่อกลม โดยมีการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ  $WR$  โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมการไหลแบบ 3 มิติ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านของแผ่นปิดเจาะรู ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบจัดขวางการไหล, การกระจาย  $Nu$  บริเวณผิวท่อ และแสดงค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซล ( $Nu/Nu_0$ ) ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ เพื่อช่วยให้อธิบายเข้าใจยิ่งขึ้น ส่วนที่ 3 นำเสนอในส่วนของความดันตกคร่อมหรือค่าความดันสูญเสียจากกรณีของไหลไหลผ่านแผ่นปิดเจาะรูที่ ค่า  $WR$  ต่างๆ และส่วนที่ 4 นำเสนอค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  ที่ค่า  $WR$  ต่างๆ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีได้อย่างชัดเจน

### 6.5.1 เส้นกระแสการไหล

ในส่วนของเส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปของเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางการไหล เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลโดยทั่วไปของการไหลผ่านแผ่นปิดเจาะรูโดยทำการพล็อตเปรียบเทียบในตำแหน่งของระนาบเดียวกันที่ค่า  $WR$  ต่างๆ ซึ่งจะช่วยในการอธิบายการหมุนวนที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นปิดเจาะรูในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.30 สำหรับโครงสร้างการไหลจะทำการพิจารณาเส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลสำหรับ  $WR = 1, 2.86, 5.71$

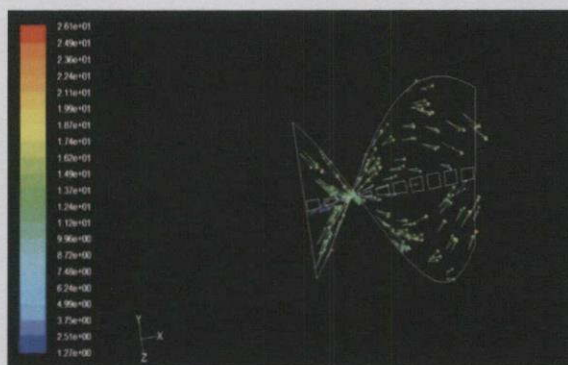


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 6.30 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหลที่  $Re = 3000$  กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่  $WR$  ต่างๆ (ก)  $WR = 1$  (ข)  $WR = 2.86$  (ค)  $WR = 5.71$

### 6.5.2 การถ่ายเทความร้อน

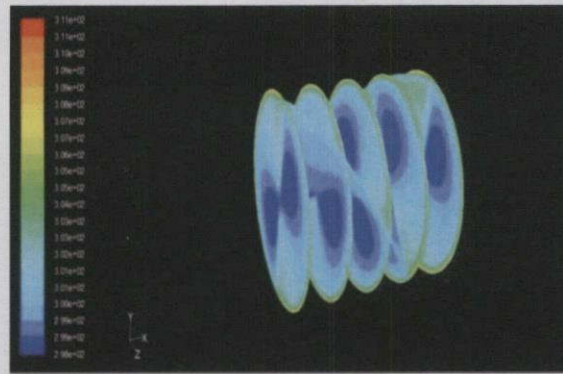
ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 6.31 การกระจาย  $Nu$  ที่บริเวณผิวท่อตั้งรูปที่ 6.32 และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลตั้งรูปที่ 6.33 ที่ค่า  $WR$  ต่างๆ



(ก)

(ข)

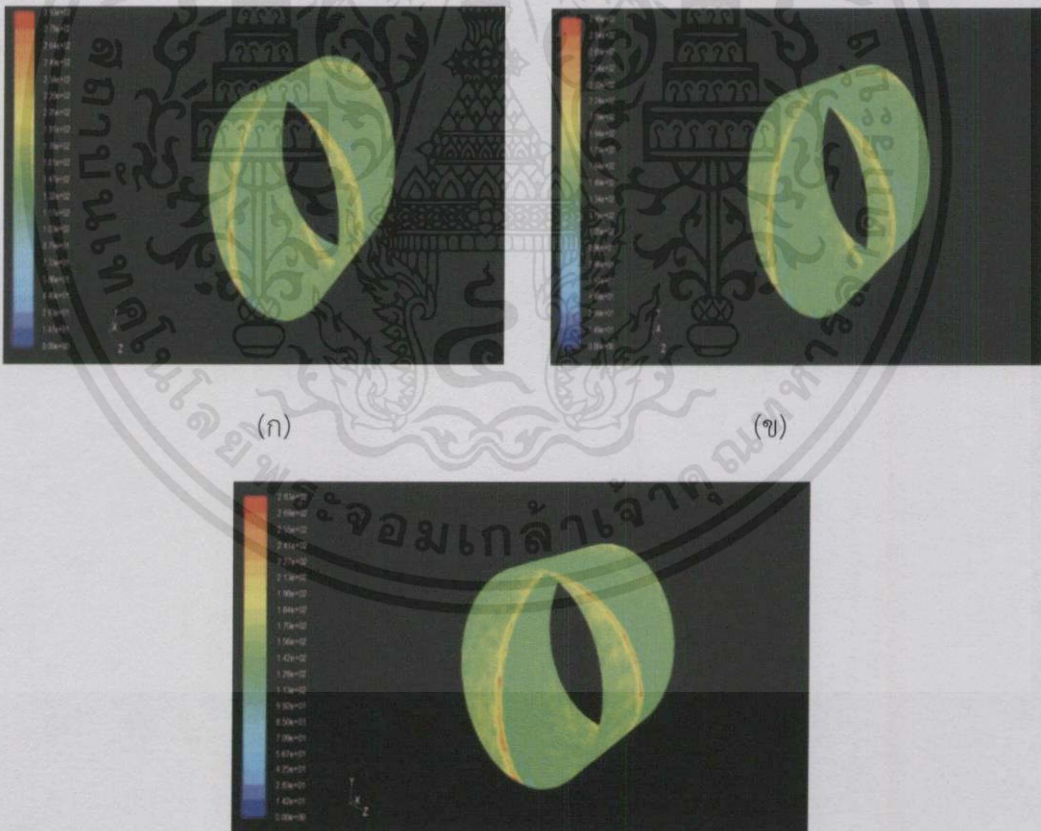
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 6.31 การกระจายอุณหภูมิตามแนวขวางการไหลที่กรณีแผ่นปิดเจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $Re = 3000$   
กรณีแผ่นปิดที่เจาะรูที่  $WR$  ต่างๆ (ก)  $WR = 1$  (ข)  $WR = 2.86$  (ค)  $WR = 5.71$

จากรูปที่ 6.31 เมื่อค่า  $WR$  เพิ่มขึ้นพบว่าไม่มีการกระจายอุณหภูมิแต่อย่างใด



(ก)

(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.32 การกระจาย  $Nu$  บนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นปิดเจาะรูสี่เหลี่ยมที่  $Re = 3000$  ที่  
 $WR$  ต่างๆ (ก)  $WR = 1$  (ข)  $WR = 2.86$  (ค)  $WR = 5.71$

จากรูปที่ 6.32 เมื่อค่า  $WR$  เพิ่มขึ้นพบว่าการถ่ายเทความร้อนแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย

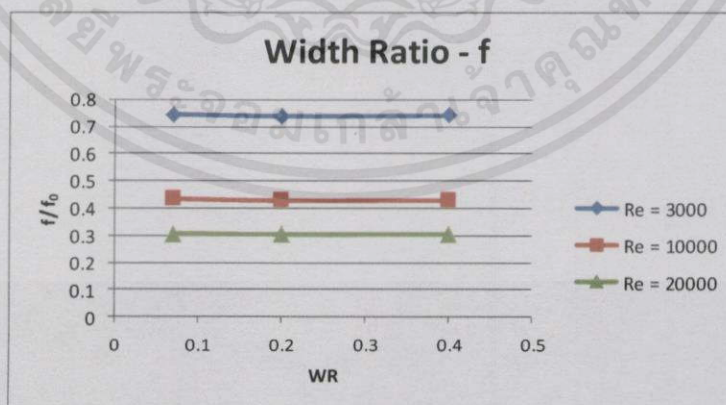


รูปที่ 6.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu/Nu_0$  กับ  $Re$  กรณีการติดตั้งแผ่นบิตเจาะรูที่  $WR$  ต่างๆ

จากรูปที่ 6.33 เมื่อ  $WR$  มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าเลขนัสเซิลกลายเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยสังเกตจากลักษณะเส้นกราฟที่วางตัวขนานไปตามแกน  $WR$  ดังนั้นการเปลี่ยนค่าของ  $WR$  จึงไม่มีผลต่อการ

### 6.5.3 ความดันตกคร่อม

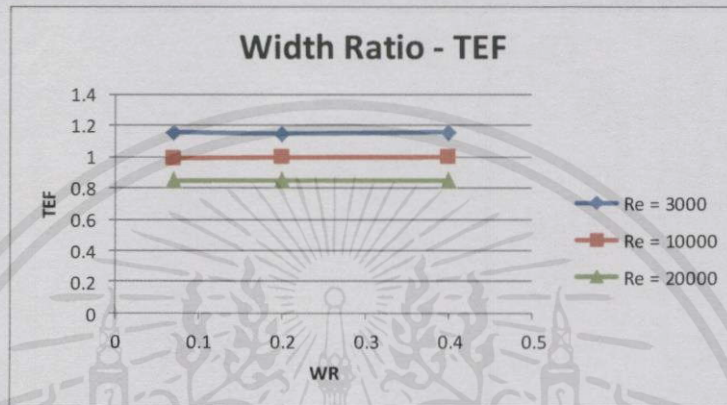
จากรูปที่ 6.34 เมื่อ  $WR$  มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าความดันตกคร่อมกลายเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยสังเกตจากลักษณะเส้นกราฟที่วางตัวขนานไปตามแกน  $WR$  ดังนั้นการเปลี่ยนค่าของ  $WR$  จึงไม่มีผลต่อความดันตกคร่อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 6.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นบิตเจาะรูที่  $WR$  ต่างๆ หน้าที่ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6.5.4 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 6.35 เมื่อ  $WR$  มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าประสิทธิภาพกลายเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยสังเกตจากลักษณะเส้นกราฟที่วางตัวขนานไปตามแกน  $WR$  ดังนั้นการเปลี่ยนค่าของ  $WR$  จึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 6.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นบิดเจาะรูที่  $WR$  ต่างๆ

#### 6.6 อิทธิพลของอัตราส่วนความยาว

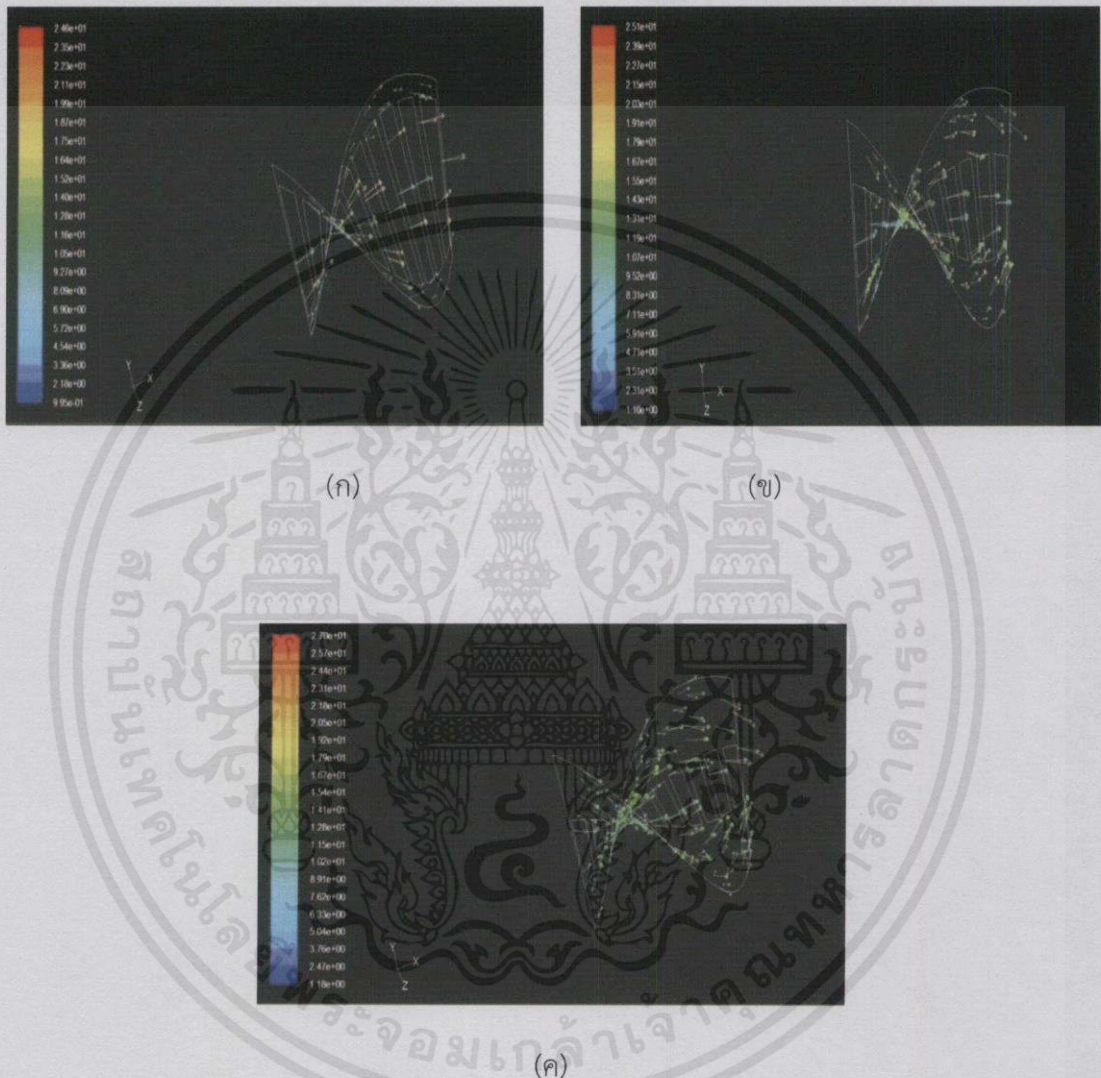
ในส่วนของอิทธิพลของ  $LR$  ได้นำเสนอกรณีศึกษาสำหรับ  $LR$  ทั้งหมด 3 ค่า 4.29, 6.28, 11.14 ในทอกลม โดยมีการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ  $LR$  โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมการไหลแบบ 3 มิติ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านของแผ่นบิดเจาะรู ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบจัดขวงการไหล, การกระจาย  $Nu$  บริเวณผิวท่อ และแสดงค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซล ( $Nu / Nu_0$ ) ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ เพื่อช่วยให้อธิบายเข้าใจยิ่งขึ้น ส่วนที่ 3 นำเสนอในส่วนของความดันตกคร่อมหรือค่าความดันสูญเสียจากกรณีของไหลไหลผ่านแผ่นบิดเจาะรูที่ค่า  $LR$  ต่างๆ และส่วนที่ 4 นำเสนอค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  ที่ค่า  $LR$  ต่างๆ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีได้อย่างชัดเจน

##### 6.6.1 เส้นกระแสการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่าทั้งนี้ให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ในส่วนของเส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปของเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวงการไหล เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลโดยทั่วไปของการไหลผ่านแผ่นบิดเจาะรูโดยการพล็อตเปรียบเทียบ

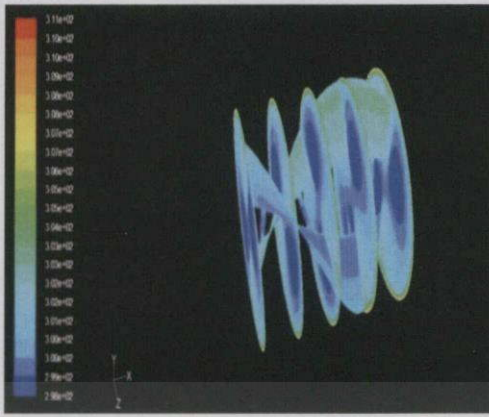
ในตำแหน่งของระนาบเดียวกันที่ค่า  $LR$  ต่างๆ ซึ่งจะช่วยในการอธิบายการหมุนวนที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นบิตเจาะรูในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.36 สำหรับโครงสร้างการไหลจะทำการพิจารณาเส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลสำหรับ  $LR = 4.29, 6.28, 11.14$



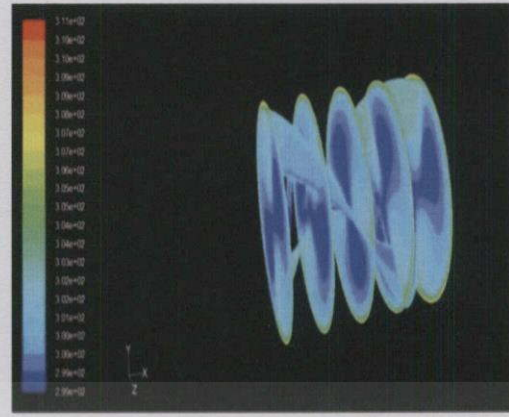
รูปที่ 6.36 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหลที่  $Re = 3000$  กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่  $LR$  ต่างๆ (ก)  $LR = 4.29$  (ข)  $LR = 6.29$  (ค)  $LR = 11.14$

### 6.6.2 การถ่ายเทความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 6.37, การกระจาย  $Nu$  ที่บริเวณผิวท่อตั้งรูปที่ 6.38 และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ตั้งรูปที่ 6.39 ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ



(ก)



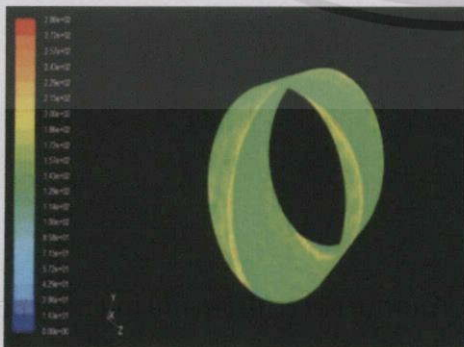
(ข)



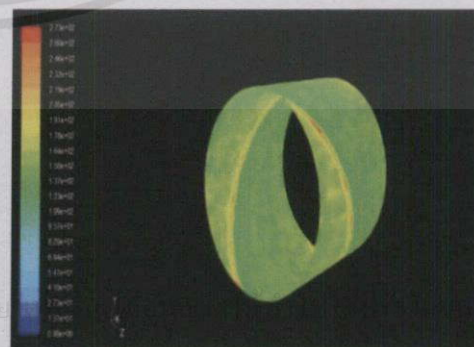
(ค)

รูปที่ 6.37 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหลที่  $Re = 3000$  กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่  $LR$  ต่างๆ (ก)  $LR = 4.29$  (ข)  $LR = 6.29$  (ค)  $LR = 11.14$

จากรูปที่ 6.37 เมื่อ  $LR$  มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าอุณหภูมิภายในท่อขึ้นสูงขึ้นโดยสังเกตจากการกระจายตัวของพื้นที่สีน้ำเงินนั้นลดลง

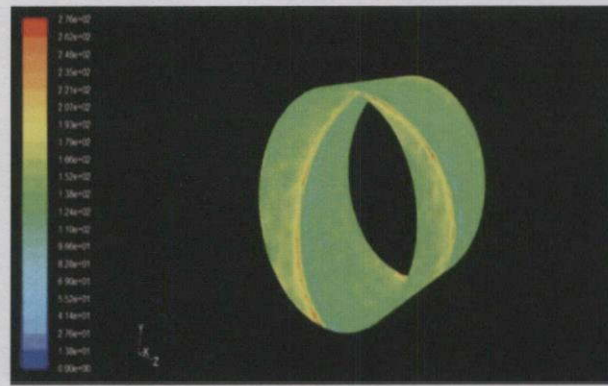


(ก)



(ข)

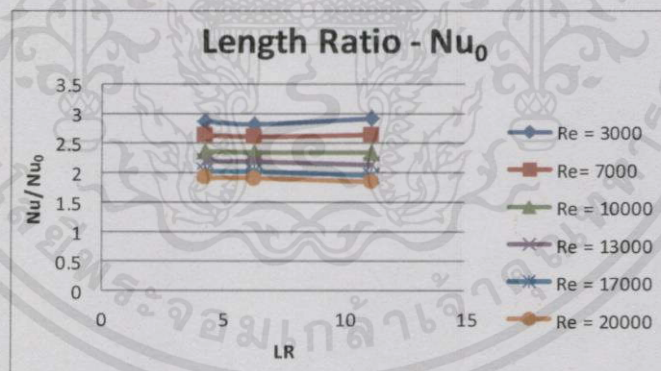
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ขอยืมมาเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้ง



(ค)

รูปที่ 6.38 การกระจาย  $Nu$  บนระนาบขวางการไหลที่  $Re = 3000$  กรณีแผ่นบิตที่เจาะรูที่  $LR$  ต่างๆ  
(ก)  $LR = 4.29$  (ข)  $LR = 6.29$  (ค)  $LR = 11.14$

จากรูปที่ 6.38 เมื่อเปลี่ยนค่า  $LR$  เป็น 4.29, 6.28 และ 11.14 ตามลำดับ พบว่าเมื่อค่า  $LR$  เพิ่มขึ้น บริเวณผิวท่อที่เคยมีการกระจายตัวของพื้นที่สีส้มซึ่งเป็นสีที่แสดงถึงอุณหภูมิที่ลดลง และเส้นสีเขียวบริเวณหน้าแผ่นบิตมีความเข้มข้น แสดงถึงอุณหภูมิที่ลดลง ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนในบริเวณนี้จึงน้อยลงเมื่อค่า  $LR$  เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันบริเวณเส้นสีแดงด้านหลังแผ่นบิตกลับชัดเจน แสดงถึงอุณหภูมิที่สูงขึ้น กล่าวคือ ค่า  $LR$  ที่มากขึ้นนั้นทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณหลังแผ่นบิตดียิ่งขึ้นนั่นเอง



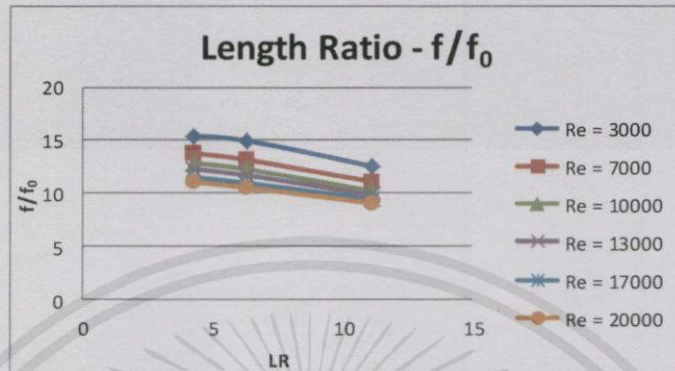
รูปที่ 6.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu / Nu_0$  กับ  $Re$  กรณีการติดตั้งแผ่นบิตเจาะรูที่  $LR$  ต่างๆ

จากรูปที่ 6.39 เมื่อ  $LR$  มีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าที่  $Re$  3000-10000 การถ่ายเทความร้อนจะดีขึ้นเล็กน้อยโดยสังเกตได้จากเส้นกราฟที่ชันขึ้น แต่ที่  $Re$  13000-20000 กลับพบว่าการถ่ายเทความร้อนนั้นแย่ลงโดยสังเกตจากเส้นกราฟที่ความชันเป็นลบ ดังนั้นค่า  $LR$  ที่เหมาะสมจึงขึ้นอยู่กับ  $Re$  ที่เหมาะสมอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.6.3 ความดันตกคร่อม

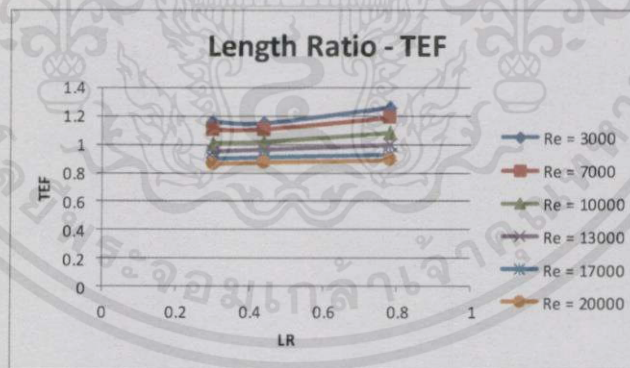
จากรูปที่ 6.40 เมื่อ  $LR$  มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าความดันตกคร่อมมีค่าลดลง โดยสังเกตจากเส้นกราฟที่มีความชันเป็นลบ



รูปที่ 6.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นบิดเจาะรูที่  $LR$  ต่างๆ

### 6.6.4 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 6.41 เมื่อ  $LR$  มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าประสิทธิภาพมีค่าสูงขึ้น โดยสังเกตจากเส้นกราฟที่มีความชันเป็นบวก



รูปที่ 6.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  กับ  $Re$  กรณีแผ่นบิดเจาะรูที่  $LR$  ต่างๆ

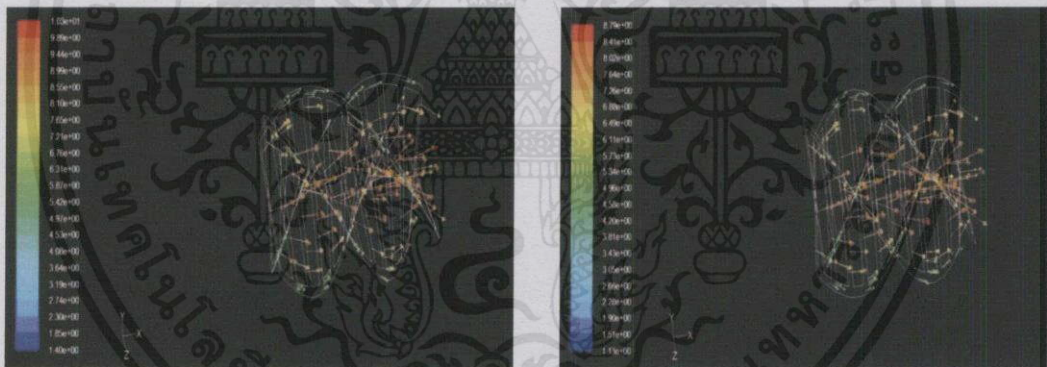
### 6.7 โครงสร้างของแผ่นบิดในรูปแบบต่างๆหลังปรับปรุง

จากการศึกษากรณีอิทธิพลไปก่อนแล้วได้นำไปพัฒนาโครงสร้างที่ปรับปรุงซึ่งเป็นโครงสร้างแบบแผ่นบิดคู่ (Duo Basic) ในส่วนของอิทธิพลของ  $Re$  ได้นำเสนอกรณีแผ่นบิดที่ปรับปรุงใน 4 แบบ ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ มีทิศทางไหลในท่อกลม โดยมีการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ  $Re$  โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอเส้นกระแสการไหลหรือพฤติกรรมการไหลแบบ 2 มิติ เพื่อให้

สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านของแผ่นบิต ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบตัดขวางการไหล, การกระจาย  $Nu$  บริเวณผิวท่อ และแสดงค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิล ( $Nu/Nu_0$ ) ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ เพื่อช่วยให้อธิบายเข้าใจยิ่งขึ้น ส่วนที่ 3 นำเสนอในส่วนของความดันตกคร่อมหรือค่าความดันสูญเสียจากกรณีของไหลไหลผ่านแผ่นบิตเจาะรูที่ ค่า  $Re$  ต่างๆ และส่วนที่ 4 นำเสนอค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีได้อย่างชัดเจน

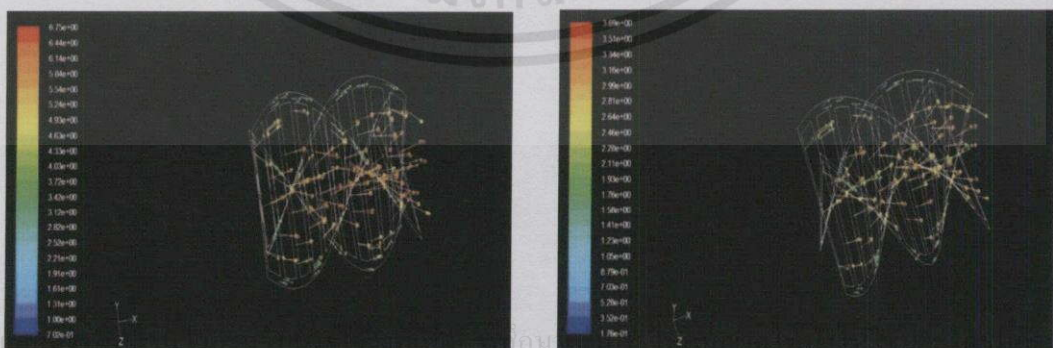
### 6.7.1 เส้นกระแสการไหล

ในส่วนของเส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปของเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางการไหล เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลโดยทั่วไปของการไหลผ่านแผ่นบิตเจาะรูโดยทำการพล็อตเปรียบเทียบในตำแหน่งของระนาบเดียวกันที่ค่า  $Re$  ต่างๆ ซึ่งจะช่วยในการอธิบายการหมุนวนที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นบิตเจาะรูในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.42 สำหรับโครงสร้างการไหลจะทำการพิจารณาเส้นกระแสการไหลในระนาบขวางการไหลสำหรับ  $Re = 3000, 7000, 10000, 13000, 17000, 20000$



(ก)

(ข)

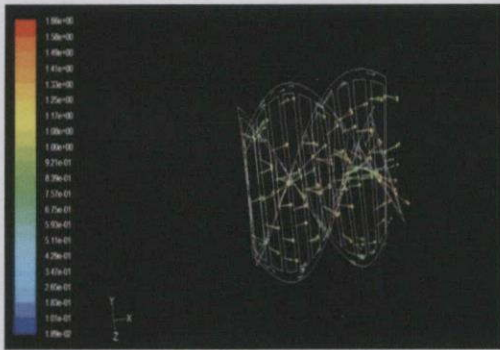


(ค)

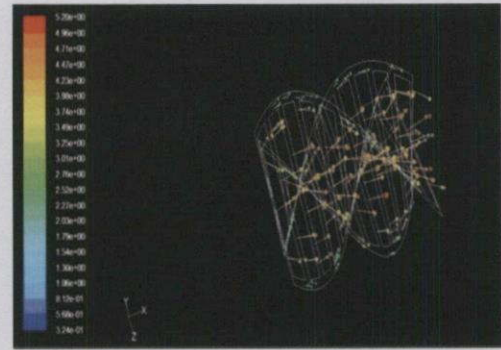
(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

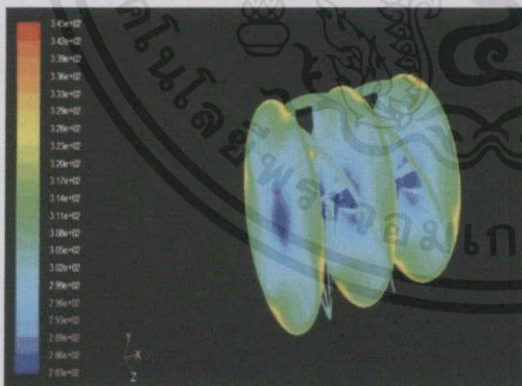


(ข)

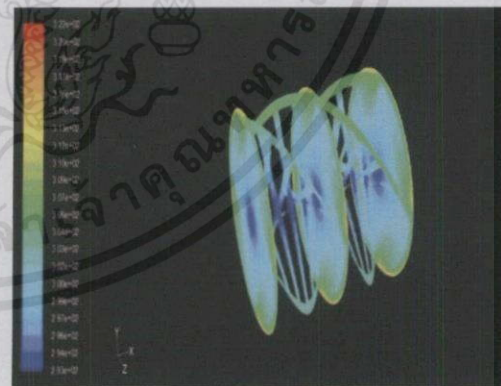
รูปที่ 6.42 เส้นกระแสการไหลบนระนาบตามการไหล กรณีแผ่นปิดคู่ที่เจาะรู (Duo Basic Case) (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 7000$  (ค)  $Re = 10000$  (ง)  $Re = 13000$  (จ)  $Re = 17000$  และ (ฉ)  $Re = 20000$

### 6.7.2 การถ่ายเทความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายของอุณหภูมิในระนาบขวางการไหล ดังรูปที่ 6.43, การกระจาย  $Nu$  ที่บริเวณผิวท่อดังรูปที่ 6.44 และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลดังรูปที่ 6.45 ที่ค่า  $Re$  ต่างๆ

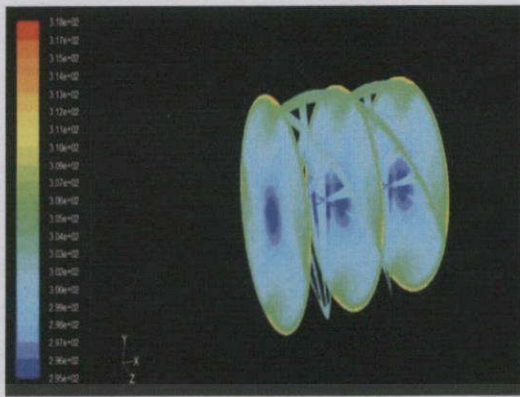


(ก)

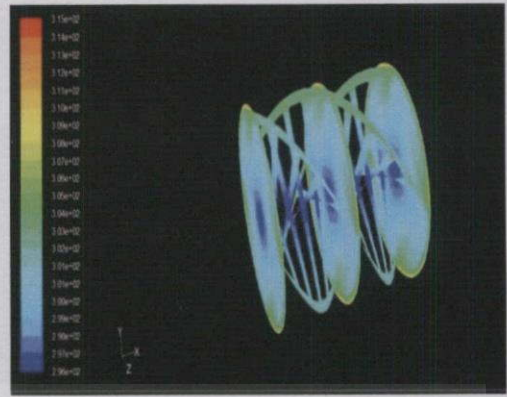


(ข)

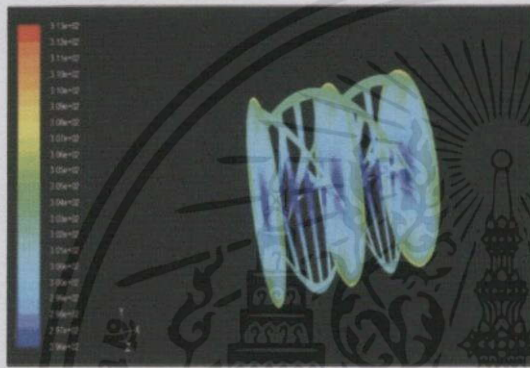
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



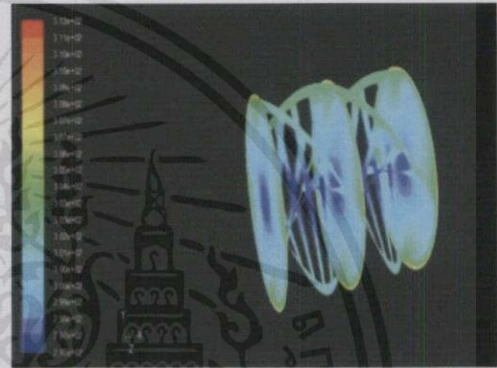
(ค)



(ง)



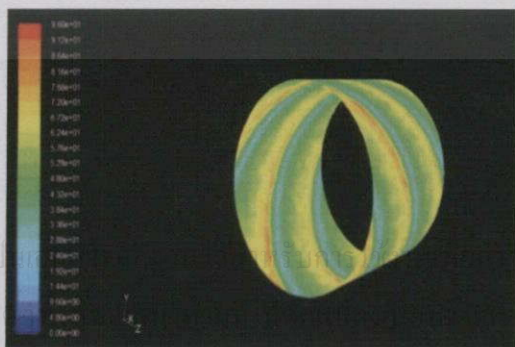
(จ)



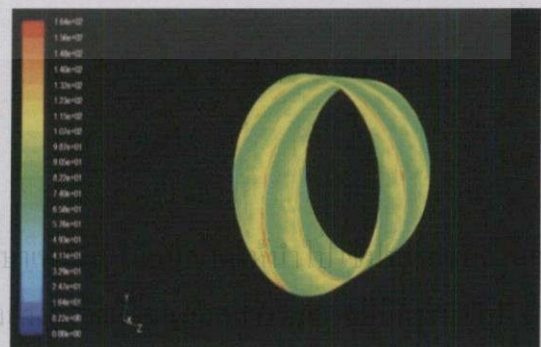
(ฉ)

รูปที่ 6.43 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิดคู่ที่เจาะรู (Duo Basic Case) สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 7000$  (ค)  $Re = 10000$  (ง)  $Re = 13000$  (จ)  $Re = 17000$  และ (ฉ)  $Re = 2000$

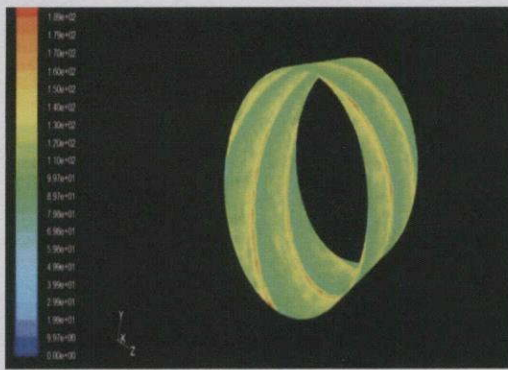
จากรูปที่ 6.43 เมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นพบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณจุดศูนย์กลางไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลง แต่บริเวณใกล้ผิวท่อนั้นพื้นที่สีเขียวและสีเหลืองมีพื้นที่ลดลง ดังนั้นอุณหภูมิจึงลดลงเมื่อเพิ่มเลขเรย์โนลด์



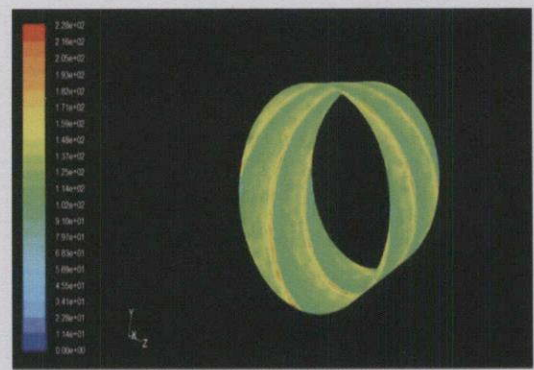
(ก)



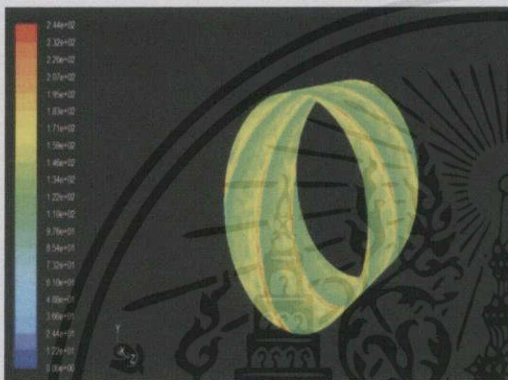
(ข)



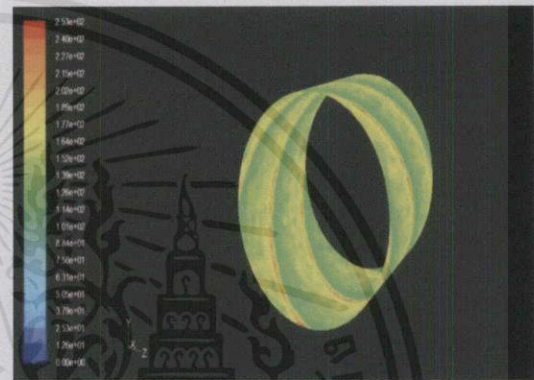
(ค)



(ง)



(จ)

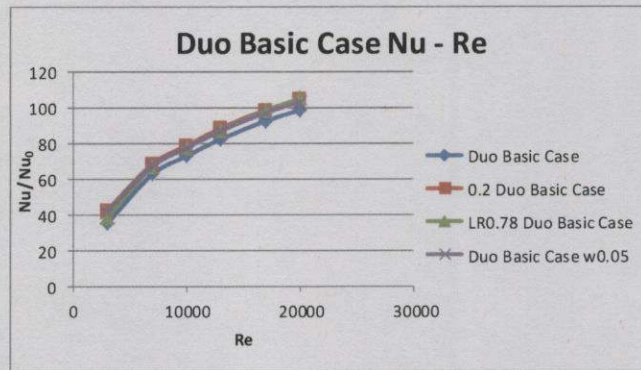


(ฉ)

รูปที่ 6.44 การกระจาย  $Nu$  บนระนาบขวางการไหล กรณีแผ่นบิดคู่ที่เจาะรู (Duo Basic Case) สำหรับ (ก)  $Re = 3000$  (ข)  $Re = 7000$  (ค)  $Re = 10000$  (ง)  $Re = 13000$  (จ)  $Re = 17000$  และ (ฉ)  $Re = 20000$

จากรูปที่ 6.44 จะพบว่าเมื่อ  $Re$  มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิภายในท่อมักมากขึ้นโดยสังเกตได้จากการกระจายตัวของสีที่แสดงถึงอุณหภูมิ โดยที่  $Re = 3000$  บริเวณด้านหลังบิดจะมีสีฟ้า จากนั้นเมื่อเพิ่ม  $Re$  บริเวณสีเขียวด้านหลังแผ่นบิดจึงค่อยๆ ถูกสีเขียวและสีเหลืองกลืนจนเป็นเส้นสีเขียวมีสีฟ้าแซมเล็กน้อยที่  $Re = 20000$  ดังนั้นเมื่อเพิ่มเลขเรย์โนลด์จะส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวท่อดีขึ้น

จากการออกแบบแผ่นบิดคู่แบบพื้นฐาน (Duo Basic Case) นำไปสู่การออกแบบแผ่นบิดคู่แบบอื่นอีก 3 แบบ ซึ่งมีลักษณะเส้นกระแสการไหล การถ่ายเทความร้อน การกระจาย  $Nu$  ที่มีลักษณะสอดคล้องกัน โดยมีนำค่าพารามิเตอร์และ กรณีศึกษาพื้นฐาน (Basic Case) มาใช้ ได้แก่ 0.2 Duo Basic Case ที่มีระยะห่างระหว่างรูสี่เหลี่ยมที่มากขึ้น,  $LR = 11.14$  นำมาพัฒนาเป็น  $LR0.78$  Duo Basic Case และ Duo Basic Case w0.05 ซึ่งลดความกว้างของรูจาก 0.07 เป็น 0.05

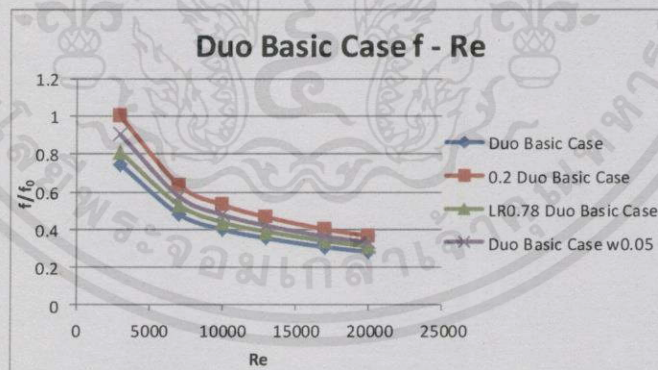


รูปที่ 6.45 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu / Nu_0$  กับ  $Re$  กรณีติดตั้งแผ่นบิดคู่ (Duo Basic Case)

จากรูปที่ 6.45 เมื่อ  $Re$  มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยดูได้จากความชันของกราฟที่สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกันพบว่าเคส 0.2 Duo basic case จะเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดในขณะที่เคส Duo basic case จะเกิดการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด

### 6.7.3 ความดันตกคร่อม

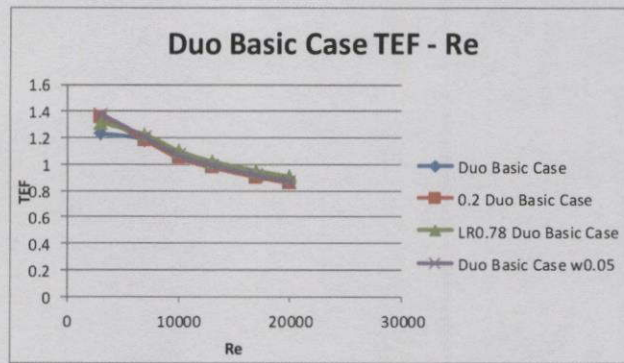
จากรูปที่ 6.46 เมื่อ  $Re$  มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าค่าความดันตกคร่อมมีค่าน้อยลง โดยดูได้จากความชันของกราฟที่ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกันพบว่าเคส 0.2 Duo basic case จะเกิดความดันตกคร่อมมากที่สุด ในขณะที่เคส Duo basic case จะเกิดการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด



รูปที่ 6.46 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f / f_0$  กับ  $Re$  กรณีติดตั้งแผ่นบิดคู่ (Duo Basic Case)

### 6.7.4 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 6.47 เมื่อ  $Re$  มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง โดยสังเกตจากความชันที่ลดลง ซึ่งในช่วงแรกเคส w0.05 Duo basic case จะให้ค่าประสิทธิภาพมากที่สุด แต่หลังจาก  $Re$  ประมาณ 7000-20000 เคส LR0.78 Duo basic case จะให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด



รูปที่ 6.47 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $TEF$  กับ  $Re$  กรณีติดตั้งแผ่นปิดคู่ (Duo Basic Case)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลอง

## 7.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของไบบิตที่มีการเจาะรูเป็นรูสี่เหลี่ยมซึ่งมีการติดตั้งในท่อกลมต่อพฤติกรรมการไหล, การถ่ายเทความร้อน, ค่าความดันตกคร่อมและสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยทำการศึกษาในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่มีค่า  $Re$  ตั้งแต่ 3000 ถึง 20000 ที่ค่า อัตราส่วนการบิด (Twisted Ratio) 1.5, 2 และ 4 ,อัตราส่วนความกว้าง (Width Ratio) 1, 2.86 และ 5.71, อัตราส่วนความยาว (Length Ratio) 4.29, 6.29 และ 11.14โดยทั่วไปโครงสร้างการไหลของแผ่นบิดเจาะรูสี่เหลี่ยมซึ่งติดตั้งภายในท่อกลมจะแบ่งเป็น 2 ลักษณะการไหล คือ การไหลแบบหมุนวน และการไหลแบบทะลุไปตามความยาวของท่อ ซึ่งลักษณะการกระแทกของของไหลกับบริเวณผนังท่อซึ่งเกิดการถ่ายเทความร้อน ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรต่างๆซึ่งกล่าวไปแล้วข้างต้น

## 7.2 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของค่า  $Re$  พบว่าเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  มีแนวโน้มลดลงสำหรับทุกกรณีการศึกษา ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นทำให้เกิดค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ลดลง นอกจากนี้ยังส่งผลถึงค่าอัตราของความดันตกคร่อมที่ลดลงอีกด้วย สำหรับกรณีที่น่ามาศึกษา พบว่าที่  $Re = 3000$  จะให้ค่า  $Nu/Nu_0$ ,  $f/f_0$  และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ( $TEF$ ) สูงที่สุด เพราะเมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้น ความเร็วภายในท่อจะมากขึ้น ทำให้ของไหลไหลทะลุไปตามความยาวท่อมากขึ้นและเกิดการผสมกันที่ไม่ดีส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวท่อและของไหลในท่อได้น้อยลง ซึ่งก็ทำให้ค่าความดันตกคร่อมก็ลดลงด้วย

7.2 อิทธิพลของอัตราส่วนการบิด (Twisted Ratio,  $TR$ )

อิทธิพลของ  $TR$  พบว่าเมื่อค่า  $TR$  เพิ่มขึ้น ค่า  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  จะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า  $TR$  เพิ่มมากขึ้นค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมจะลดลง สำหรับทุกกรณีการศึกษา ที่ค่า  $TR=1.5$  จะให้ค่า  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  มากที่สุดและที่ค่า  $TR=4$  จะให้ค่า  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  ที่น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อค่า  $TR$  เพิ่มขึ้นค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ( $TEF$ ) กลับเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการลดลงของ  $f/f_0$  นั้นสูงกว่าอัตราการ

ลดลงของ  $Nu/Nu_0$  กล่าวคือ ความดันตกคร่อมลดลงอย่างมากแต่การถ่ายเทความร้อนลดลงเพียงเล็กน้อย

### 7.3 อิทธิพลของอัตราส่วนความกว้าง

อิทธิพลของ  $WR$  พบว่าเมื่อค่า  $WR$  เพิ่มขึ้น ค่า  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  จะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สำหรับทุกระณิกการศึกษ ส่งผลให้ค่า  $TEF$  มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย

### 7.4 อิทธิพลของอัตราส่วนความยาว

อิทธิพลของ  $LR$  พบว่าเมื่อค่า  $LR$  เพิ่มขึ้น ค่า  $Nu/Nu_0$  จะมีค่าแตกต่างกันไม่มาก โดยในช่วง  $Re = 3000-10000$   $LR = 11.14$  ค่า  $Nu/Nu_0$  จะมีค่าสูงที่สุดและเริ่มลดลงมาต่ำกว่า  $LR = 4.29$  และ  $6.29$  ที่ช่วง  $Re = 10000-20000$  ส่วน  $f/f_0$  จะมีค่าลดลง ที่ค่า  $LR = 4.29$  จะให้ค่า  $f/f_0$  มากที่สุดและที่ค่า  $LR = 11.14$  จะให้ค่า  $f/f_0$  ที่น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อค่า  $LR$  เพิ่มขึ้นค่าค่าของ  $TEF$  มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอัตราการลดลงของ  $f/f_0$  นั้นสูงกว่าอัตราการลดลงของค่า  $Nu/Nu_0$  กล่าวคือ ความดันตกคร่อมลดลงอย่างมากแต่การถ่ายเทความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

### 7.5 อิทธิพลของแผ่นบิดคู่

ในการศึกษาอิทธิพลของแผ่นบิดคู่ 4 แบบ คือ แผ่นบิดคู่แบบธรรมดา, แผ่นบิดคู่แบบลดจำนวนรู, แผ่นบิดคู่แบบมีอัตราส่วนความยาวเท่ากับ 11.14 และแผ่นบิดคู่แบบลดความกว้างของรู จากผลการทดลองพบว่าแผ่นบิดคู่ทุกแบบทำให้อัตราส่วน  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยแผ่นบิดคู่แบบลดจำนวนรูทำให้อัตราส่วน  $Nu/Nu_0$  มีค่าสูงสุด ส่วนแผ่นบิดคู่แบบธรรมดาทำให้อัตราส่วน  $f/f_0$  มีค่าต่ำสุด และแผ่นบิดคู่แบบลดความกว้างของรูให้  $TEF$  สูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] P. Promvong, S. Eiamsa-ard (2006), Heat transfer and turbulent flow friction in a circular tube fitted with conical-nozzle turbulators, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.34, September 2006, pp.72–82.
- [2] M. Rahimia, S. Shabaniyan, Ammar, A. Alsairafi, (2009), Experimental and CFD studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube equipped with modified twisted tape inserts, *Chemical Engineering and Processing*, 1 October 2008, pp. 762–770.
- [3] P. Naphon (2006), Heat transfer and pressure drop in the horizontal double pipes with and without twisted tape insert, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.33, 21 October 2005, pp.166-175.
- [4] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Promvong (2006), Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.33, 27 September 2006, pp.1225-1233
- [5] S. Krishna, G. Pathipaka, P. Sivashanmugam (2009), Heat transfer and pressure drop studies in a circular tube fitted with straight full twist, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol.33, 25 October 2008, pp.431-438
- [6] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Eiamsa-ard (2009), Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tapes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol.34, April 2009, pp.53–62.
- [7] S. Eiamsa-ard, P. Promvong (2010), Thermal characteristics in round tube fitted with serrated twisted tape, *Applied Thermal Engineering*, vol.30, 27 March 2010, pp. 1673-1682
- [8] P. Murugesan, K. Mayilsamy, S. Suren, P.S.S Srinivasan (2011), Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.38, 10 December 2010, pp. 329–334
- [9] C.Thianpong, P. Eiamsa-ard, P. Promvong, S. Eiamsa-ard (2011), Effect of perforated twisted-tapes with parallel wings on heat transfer enhancement in a heat exchanger tube, *Energy Procedia*, vol.14, December 2011, pp.1117 – 1123.
- [10] S. Eiamsa-ard, V. Kongkai-paiboon, P. Promvong (2011), Thermal performance assessment of turbulent tube flow through wire coil turbulators, *Heat Transfer Engineering*, vol.32, 2011, pp.11–12.
- [11] H. Bas, V. Ozceyhan (2012), Heat transfer enhancement in a tube with twisted tape inserts placed separately from the tube wall, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol.41, 30 March 2012, pp. 51–58. เอกสารนี้ได้รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- [12] P. Promvong, S. Pethkool, M. Pimsarn, C. Thianpong (2012), Heat transfer augmentation in a helical-ribbed tube with double twisted tape inserts, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.39, 1 June 2012, pp. 953–959.

- [13] K. Nanan, K. Yongsiri, K. Wongcharee, C. Thianpong, S. Eiamsa-ard (2013), Heat transfer enhancement by helically twisted tapes inducing co- and counter-swirl flows, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.46, pp. 67-73.
- [14] K. Nanan, C. Thianpong, P. Promvong, S. Eiamsa-ard (2014), Investigation of heat transfer enhancement by perforated helical twisted-tapes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.52, 13 January 2014, pp.106-112
- [15] Ralph L. Webb and Nae-Hyun Kim, J.F. (2005). *Principles of Enhanced Heat Transfer*, 2<sup>nd</sup> edition, ISBN: 1-59169-014-5, Taylor & Francis, New York.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

$T$ (K)	$\rho$ (kg/ $m^3$ )	$c_p$ (kJ/kg.K)	$\mu \times 10^7$ (N.s/ $m^3$ )	$\nu$ ( $m^2/s^2$ )	$k \times 10^6$ (W/m.K)	$\alpha \times 10^6$ ( $m^2/s$ )	$Pr$
อากาศ							
100	3.25562	1.032	71.1	2.0	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.59	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	22.5	0.707
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.990	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	67.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	296	137	589	0.672