

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใส่  
แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม

NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION IN A HEAT EXCHANGER TUBE  
WITH POLYGON CONICAL RING INSERTS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-030-178

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใส่  
แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม

NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION IN A HEAT EXCHANGER TUBE  
WITH POLYGON CONICAL RING INSERTS



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **148713**  
ใน เดือน ปี 23 พ.ย. 2560

b. 00267059  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-030-178

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION IN A HEAT EXCHANGER TUBE  
WITH POLYGON CONICAL RING INSERTS



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน  
ที่มีการใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม

Thesis Title Numerical Heat Transfer Investigation in a Heat Exchanger Tube with  
Polygon Conical Ring Inserts

นักศึกษา นายราชนันท์ พูลเพิ่ม

รหัสประจำตัว 56601162

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-030-178

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ณัฐวิภา	เจียรระโนวชิระ
ผศ.ดร.วิชาดา	เจษฎารัตนชัย
ผศ.ดร.สมชาย	ศรียุพัฒน์พิพัฒน์
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอยู่ใต้อาณัติของเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการนำไปใช้  
วันที่ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม
นักศึกษา	นายราชันย์ พูลเพิ่ม
รหัสนักศึกษา	56601162
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT ในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนสามมิติ ที่มีลักษณะการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการไหล มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมในท่อกลมที่มีลักษณะเป็นแบบลู่ออก (diverging conical ring, CR) โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ซึ่งพิจารณาอัตราการไหลในเทอมของเลขเรย์โนลด์ส์อยู่ในช่วง 3,000 ถึง 20,000 การศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนได้นำเสนอในเทอมของเลขนัสเซลท์ ( $Nu$ ) การสูญเสียความดันในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (thermal enhancement factor, TEF) เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของท่อกลมผิวเรียบและข้อมูลท่อที่ติดตั้งกรวยกลมที่เงื่อนไขเดียวกันซึ่งพบว่าระหว่างผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับข้อมูลการทดลองมีความสอดคล้องกันดียิ่ง การศึกษาต่อมาพบว่าแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแต่มีค่าความเสียดทานน้อยกว่าการใช้แหวนทรงกรวยกลมปกติ เมื่อปรับเปลี่ยนรูปของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมให้เป็นทรงรูปสี่เหลี่ยมและรูปเพชรพบว่าช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากยิ่งขึ้นและยังทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าน้อยลงอีกเมื่อเทียบกับแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมธรรมดา อันเป็นผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงมากยิ่งขึ้นกว่าแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม ดังนั้นแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมรูปสี่เหลี่ยมและรูปเพชรจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมมากสำหรับการออกแบบเพื่อให้ได้ระบบการทำความร้อนและความเย็นที่มีประสิทธิภาพต่อไป

Thesis	Numerical Heat Transfer Investigation in a Heat Exchanger Tube with Polygon Conical Ring Inserts
Student	Mr.Rachan Poonperm
Student ID.	56601162
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

## ABSTRACT

The research presents a numerical heat transfer study using ANSYS FULENT for calculation of a three dimensional, fully periodic turbulent flow in a round tube with polygonal conical ring (PCR) inserts. Air as the test fluid enters the inserted tube with the airflow rate in terms of Reynolds number from 3,000 to 20,000. The heat transfer and pressure loss are displayed in the form of Nusselt number ( $Nu$ ), friction factor ( $f$ ) and thermal enhancement factor (TEF). The numerical heat transfer and friction factor result was initially validated by comparing with those from available experimental data and from smooth tube and an excellent agreement between the numerical and experimental results is found. The study reveals that the polygon conical ring provides higher heat transfer but less friction factor than the typical conical ring (CR). In addition, the modification of the PCR in the form of wedge shape and diamond shape yields considerably higher heat transfer and lower friction factor than the PCR leading to much higher thermal performance than the PCR and the CR. Therefore, the wedge-shaped and diamond-shaped PCRs are the best choice for use in design to obtain the efficient heating/cooling system.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาและการให้คำปรึกษาที่มีคุณค่าจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านที่ได้ให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านสำหรับคำแนะนำเพิ่มเติม

ขอขอบพระคุณ ดร.สมบัติ ทำนา และ ผศ.ดร.วิชาดา เจษฎารัตนชัย ที่กรุณาชี้แนะให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลืออย่างดีแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีประสิทธิภาพและสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณเอก ธรรมวิวัฒน์ ที่ให้คำปรึกษาและให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้าน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา บุคคลในครอบครัว ที่ได้ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องแก่ข้าพเจ้า ตลอดจนครูอาจารย์ที่ได้มอบความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ราชันย์ พูลเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	3
1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2.1 Fully developed flow and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of cross-sectional area.....	5
2.2.2 Flow-induced vibration analysis of conical rings used for Heat transfer enhancement in heat exchangers.....	5
2.2.3 Heat transfer and exergy loss in cut out conical turbulators.....	6
2.2.4 Heat transfer and turbulent flow friction in a circular tube fitted with conical-nozzle turbulators.....	7
2.2.5 Heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts.....	7
2.2.6 Experimental investigation of heat transfer and turbulent flow friction in a tube fitted with perforated conical-rings.....	8
2.2.7 Experimental research on heat transfer of water in tube with conical ring inserts in transient regime.....	9
2.2.8 Heat transfer and exergy loss in conical spring turbulators.....	9
2.2.9 Effect of conical cut-out turbulators with internal fins in a circular tube on heat transfer and friction.....	10
2.2.10 Numerical and experimental investigation of heat transfer behavior in a round tube with the special conical ring inserts.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.11 Experimental and numerical analysis for effects of using conical ring on turbulent flow and heat transfer in a double pipe air to water heat exchanger.....	11
2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย .....	13
บทที่ 3 สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	14
3.1 บทนำ.....	14
3.2 สมมุติฐานและสมการในการคำนวณ .....	14
3.3 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น.....	14
3.3.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์ของไหล.....	14
3.3.2 การไหลแบบราบเรียบหรือการไหลเป็นชั้นๆ (Laminar Flow) กับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) .....	15
3.3.3 การไหลในท่อกลม .....	16
3.3.4 ตัวประกอบความเสียดทาน .....	17
3.4 การพาความร้อน.....	18
3.4.1 หลักการพื้นฐานของการพาความร้อน .....	18
3.4.2 ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน .....	18
3.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	19
3.4.4 ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน .....	20
3.5 การคำนวณการไหลแบบชั่วเป็นช่วง .....	20
3.5.1 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความเร็ว.....	20
3.5.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลชั่วเป็นช่วง .....	20
3.5.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลชั่วเป็นช่วง.....	21
3.5.2 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความร้อน.....	22
3.6 สมการพื้นฐานและแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน.....	22
3.6.1 สมการควบคุม.....	23
3.6.2 แบบจำลองความปั่นป่วน .....	23
3.6.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k - \epsilon$ .....	24
3.6.2.2 การคู่ควบของความดันและความเร็ว .....	25
3.6.2.3 วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK.....	26
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์และขั้นตอนการศึกษา .....	28
4.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่ใช้ในการศึกษา.....	28
4.1.1 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 4.1.2 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด aspect ratio,  $a_r$ ) พื้นผิวด้านนอก 29 คำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ้ม).....	30
4.1.4 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ้มกลับทิศ).....	31
4.1.5 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชร).....	32
4.2 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์ปัญหา .....	36
4.3 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ .....	37
4.4 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข .....	37
4.4.1 การตรวจสอบแบบจำลองปั่นป่วน .....	37
4.4.2 การตรวจสอบกระบวนวิธี (scheme).....	39
4.5 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม .....	40
4.6 วิธีการดำเนินการศึกษา .....	42
บทที่ 5 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล.....	43
5.1 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม.....	43
5.1.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม .....	43
5.1.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม .....	44
5.1.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม .....	45
5.1.4 เลขนัสเซิลท์และอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม แบบดั้งเดิม .....	46
5.1.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม .....	47
5.1.6 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม .....	49
5.2 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 .....	50
5.2.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด aspect ratio) .....	50
5.2.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด aspect ratio) .....	53
5.2.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด aspect ratio) .....	54
5.2.4 อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด aspect ratio) .....	55
5.2.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด aspect ratio) .....	56
5.2.6 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด aspect ratio) .....	58
5.3 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 .....	59
5.3.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ้ม).....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 5.3.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ้ม) โยชนันต์ 59 คำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ่ม).....	62
5.3.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ่ม).....	63
5.3.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ่ม).....	64
5.3.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ่ม).....	65
5.3.6 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ่ม).....	67
5.4 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3.....	68
5.4.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ่มกลับทิศ).....	68
5.4.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ่มกลับทิศ).....	71
5.4.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ่มกลับทิศ).....	72
5.4.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ่มกลับทิศ).....	73
5.4.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ่มกลับทิศ).....	74
5.4.6 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ่มกลับทิศ).....	76
5.5 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4.....	77
5.5.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชรที่ระยะตัด 0.25D, 0.5D, 0.75D).....	77
5.5.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชรที่ระยะตัด 0.25D, 0.5D, 0.75D).....	78
5.5.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชรที่ระยะตัด 0.25D, 0.5D, 0.75D).....	81
5.5.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชรที่ระยะตัด 0.25D, 0.5D, 0.75D).....	83
5.5.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชรที่ระยะตัด 0.25D, 0.5D, 0.75D).....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5.6 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชรที่ระยะตัด 0.25D, 0.5D, 0.75D).....	86
5.6 อิทธิพลจากอัตราส่วนความกว้างทางเข้าของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม .....	87
5.7 อิทธิพลจากอัตราส่วนความกว้างทางออกของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม.....	90
5.8 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ .....	94
5.9 อิทธิพลของอัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อความกว้างที่อกกลม.....	97
5.10 การอภิปรายงานวิจัย.....	101
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	103
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	103
6.1.1 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์สเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมภายใน ที่อกกลม.....	103
6.1.2 อิทธิพลของมุมปะทะหรือมุมที่ทำการปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม....	103
6.1.3 อิทธิพลของการปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม.....	103
6.1.4 อิทธิพลของความกว้างของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่ทางเข้า .....	103
6.1.5 อิทธิพลของความกว้างของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่ทางออก .....	104
6.1.6 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ .....	104
6.1.7 อิทธิพลของอัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อความกว้างที่อกกลม.....	104
6.2 ข้อเสนอแนะและการพัฒนางานวิจัย.....	104
เอกสารอ้างอิง .....	105
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ.....	108
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	110
ประวัติผู้เขียน.....	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 จำนวนของกริดที่ใช้ในการทดสอบ.....	40
5.1 สรุปผลดีที่สุดในแต่ละกรณีที่ได้จากการศึกษาแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมเมื่อใส่ ภายในท่อกลม.....	102
ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ .....	109



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	6
2.2 แสดงรูปแบบการตัดและขนาดของแหวนทรงกรวย.....	6
2.3 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวย (a) จัดวางแบบ C-nozzle และ (b) จัดวางแบบ D-nozzle.....	7
2.4 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวย a) จัดวางแบบ DR b) จัดวางแบบ CR c) จัดวางแบบ CDR.....	8
2.5 แสดงการจัดวางแหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรูแบบตามกระแสการไหล.....	8
2.6 แสดงลักษณะของแหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรู.....	9
2.7 รูปทรงของแหวนสปริงทรงกรวย และรูปแบบการจัดวางแบบ DR, CR และ CDR.....	10
2.8 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวย (a) รูปแบบชุดทดลอง (b) จัดวางแบบ C-Type (c) จัดวางแบบ D-Type .....	10
2.9 (a) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องและรูปแบบของชุดทดลอง (b) แหวนทรงกรวยที่เจาะรู (c) การจัดวางแบบ DCR (d) การจัดวางแบบ RCR.....	12
3.1 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลผ่านผิวของวัตถุ.....	15
3.2 การไหลอย่างสมบูรณ์ภายในท่อกลม.....	17
3.3 ตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลแบบสมบูรณ์ในท่อกลม .....	18
3.4 รูปทรงเรขาคณิตที่เข้าเป็นช่วง .....	21
3.5 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ.....	27
4.1 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมแบบดั้งเดิม.....	28
4.2 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด $d_r$ ).....	29
4.3 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ้ม).....	30
4.4 ภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ้ม) .....	30
4.5 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ้มกลับทิศ) .....	31
4.6 ภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ้มกลับทิศ) .....	32
4.7 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4-1.....	33
4.8 ภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4-1 .....	33
4.9 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4-2.....	34
4.10 ภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4-2.....	34
4.11 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4-3 .....	35
4.12 ภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4-3.....	35
4.13 เลขนัสเซิลท์จากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\epsilon$ และผลการทดลองของ Promvonge.....	38
4.14 ตัวประกอบเสียดทานจากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\epsilon$ และผลการทดลองของ Promvonge..	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 เลขนัสเซลล์ท์จากกระบวนการวนวิธีต่างๆ และผลการทดลองของ Promvonge .....	39
4.16 ตัวประกอบเสียดทานที่กระบวนการวนวิธีต่างๆ และผลการทดลองของ Promvonge.....	39
4.17 รูปแบบกริดและขอบเขตการไหลของท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม .....	40
4.18 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า $Nu$ ที่ $Re=3,000$ .....	41
4.19 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า $f$ ที่ $Re=3,000$ .....	41
5.1 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมแบบดั้งเดิม.....	44
5.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมแบบดั้งเดิม.....	44
5.3 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมแบบดั้งเดิม.....	45
5.4 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมแบบดั้งเดิม.....	45
5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม และแหวนทรงกรวยผิวเรียบ (ก)ค่าเลขนัสเซลล์ท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ .....	46
5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบ ดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยผิวเรียบ (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วน ตัวประกอบเสียดทาน .....	48
5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวน ทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยผิวเรียบ .....	49
5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมที่ $\alpha_r$ ขนาดต่างๆ (ก)ค่าเลขนัสเซลล์ท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ .....	50
5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมที่ $\alpha_r$ ขนาดต่างๆ (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน .....	51
5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมรูปสี่เหลี่ยมที่ $\alpha_r$ ขนาดต่างๆ .....	52
5.11 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 .....	53
5.12 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 .....	53
5.13 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 .....	54
5.14 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 .....	54
5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 เทียบกับแบบดั้งเดิม (ก)ค่าเลขนัสเซลล์ท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ .....	55
5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุง แบบที่ 1 เทียบกับแบบดั้งเดิม (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบ เสียดทาน .....	57
5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ของ แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 เทียบกับแบบดั้งเดิม .....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แลx๗ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมทรงกลม ที่มุมปะทะต่างๆ (ก)ค่าเลขนัสเซลล์ต์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ .....	59
5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมทรงกลม ที่มุมปะทะต่างๆ (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน .....	60
5.20 สมรรถนะเชิงความร้อนของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมทรงกลมที่มุมปะทะต่างๆ .....	61
5.21 รูปทรงของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยทรงหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 .....	62
5.22 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 .....	62
5.23 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 .....	63
5.24 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 .....	63
5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 เทียบกับแหวนหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ก)ค่าเลขนัสเซลล์ต์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ .....	64
5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 เทียบกับแหวนหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน .....	66
5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวน ทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 เทียบกับแหวนปรับปรุงแบบที่ 1 .....	67
5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมทรงกลม กลับทิศที่มุมปะทะต่างๆ (ก)ค่าเลขนัสเซลล์ต์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ .....	68
5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมทรงกลม กลับทิศที่มุมปะทะต่างๆ (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ..	69
5.30 สมรรถนะเชิงความร้อนของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมทรงกลมกลับทิศที่มุมปะทะต่างๆ .....	70
5.31 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 .....	71
5.32 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 .....	71
5.33 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 .....	72
5.34 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 .....	72
5.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 (ก)ค่าเลขนัสเซลล์ต์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ .....	73
5.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน .....	75
5.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 .....	76
5.38 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด = 0.25D) .....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.39 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด = $0.5D$ ).....	77
5.40 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด = $0.75D$ ) .....	78
5.41 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด = $0.25D$ ).....	78
5.42 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด = $0.5D$ ).....	79
5.43 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด = $0.75D$ ).....	79
5.44 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด = $0.25D$ ).....	80
5.45 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด = $0.5D$ ).....	80
5.46 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด = $0.75D$ ).....	81
5.47 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด = $0.25D$ ).....	82
5.48 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด = $0.5D$ ).....	82
5.49 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด = $0.75D$ ).....	83
5.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4 (ก)ค่าเลขนัสเซิลท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์.....	84
5.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4 (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน .....	85
5.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4.....	86
5.53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2, 3 และ 4.....	87
5.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ $D_{R,i} = 0.5, 0.6$ และ $0.7$ (ก)ค่าเลขนัสเซิลท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ .....	88
5.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ $D_{R,i} = 0.5, 0.6$ และ $0.7$ (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน .....	89
5.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ $D_{R,i} = 0.5, 0.6$ และ $0.7$ .....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.57 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ $D_{R,o} = (0.79, 0.95), (0.81, 0.97)$ และ $(0.83, 0.99)$ (ก)ค่าเลขนัสเซลล์ต์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ .....	91
5.58 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ $D_{R,o} = (0.79, 0.95), (0.81, 0.97)$ และ $(0.83, 0.99)$ (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน .....	92
5.59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ $D_{R,o} = (0.79, 0.95), (0.81, 0.97)$ และ $(0.83, 0.99)$ .....	94
5.60 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ $P_R = 2.0, 2.5$ และ $3.0$ (ก)ค่าเลขนัสเซลล์ต์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ .....	95
5.61 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ $P_R = 2.0, 2.5$ และ $3.0$ (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ...	96
5.62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ $P_R = 2.0, 2.5$ และ $3.0$ .....	97
5.63 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ $\ell_E / D = 0.5, 1.0$ และ $1.5$ (ก)ค่าเลขนัสเซลล์ต์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ .....	98
5.64 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ $\ell_E / D = 0.5, 1.0$ และ $1.5$ (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน .....	99
5.65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ $\ell_E / D = 0.5, 1.0$ และ $1.5$ .....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพา, $m^2$
$A_c$	พื้นที่หน้าตัดของท่อ, $m^2$
$a_r$	อัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง
$D_{R,i}$	อัตราส่วนความกว้างทางเข้า ( $d_i / D$ ), m
$D_{R,o}$	อัตราส่วนความกว้างทางออก ( $d_o / D$ ), m
$l_E$	ความยาวแหวนทรงกรวย, m
$c_p$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, $J/kg \cdot K$
$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อกลม, m
$f$	ตัวประกอบเสียดทาน
$f_0$	ตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบ
$g$	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก, $m/s^2$
$G_k$	การก่อกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วน
$h$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$
$K$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน
$k$	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนต่อหน่วยมวล, $J/kg$
$L$	ความยาวตลอดช่วงการไหล, m
$l_E / D$	อัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก
$m$	มวล, kg
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล, $kg/s$
$Nu$	เลขนัทเชลท์เฉลี่ย
$Nu_0$	เลขนัทเชลท์ของท่อกลมผิวเรียบ
$P$	เส้นรอบรูป, m
$p$	ความดันสถิต, Pa
$P_R$	อัตราส่วนพิตช์
$Pr$	เลขพรานด์
$q''_s$	ฟลักซ์ความร้อนระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ, $W/m^2$
$Q$	เทอมการเพิ่มความร้อนทั้งหมดภายในโดเมน
$Re$	เลขเรย์โนลด์ส
$S_{ij}$	เทนเซอร์ค่าเฉลี่ยของอัตราความเครียด, $s^{-1}$
$T$	อุณหภูมิ, K
$T_s$	อุณหภูมิผิว, K
$T_\infty$	อุณหภูมิกระแสหลัก, K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$TEF$	ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อนหรือสมรรถนะเชิงความร้อน
$t$	เวลา, s
$U_i$	ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน $x_i$ , m/s
$u_i$	ความเร็วย่อยในแนวแกน $x_i$ , m/s
$V$	ความเร็วการไหล, m/s
$V$	ปริมาตร, $m^3$
$x$	พิกัดบอกทิศทางการไหล

### สัญลักษณ์กรีก

$\Gamma$	สัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อน
$\alpha$	มุมปะทะ
$\phi$	ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อหน่วยมวล
$\mu$	ความหนืดสัมบูรณ์, $N \cdot s / m^2$
$\nu$	ปริมาตรจำเพาะ, $m^3 / kg$
$\gamma$	น้ำหนักจำเพาะ
$\varepsilon$	อัตราการสูญเสียของความปั่นป่วน, $m^2 / s^3$
$\rho$	ความหนาแน่น, $kg / m^3$
$\tau$	ความเค้นเฉือน, $N / m^2$
$\sigma$	เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ

### ตัวห้อย

0	ท่อผิวเรียบ (smooth duct)
a	อากาศ (air)
m	เฉลี่ย (mean)
w	ผนัง (wall)
$R_i$	อัตราส่วนทางเข้า (inlet ratio)
$R_o$	อัตราส่วนทางออก (outlet ratio)
1	ระนาบปะทะด้านหน้า (front attack plane)
2	ระนาบปะทะย้อนกลับ (reverse attack plane)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านของไหลที่ใช้ โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องสัมผัสกัน ซึ่งปรากฏในรูปแบบที่หลากหลาย เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่นครีบและท่อ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่น เป็นต้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนิยมใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมต่างๆอย่างกว้างขวาง จึงมีความจำเป็นที่ต้องพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการใช้งานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการใช้งานที่ดียิ่งขึ้นและลดต้นทุนที่ใช้

การพาความร้อน (Heat Convection) เป็นหัวใจสำคัญของกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การเพิ่มประสิทธิภาพของการพาความร้อนจะช่วยเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้น โดยสามารถทำได้สองวิธีคือ 1) วิธีที่ต้องการพลังงานจากภายนอกเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Active technique) คือ การนำอุปกรณ์ทางกลหรือทางไฟฟ้าจากภายนอกมาช่วยเพิ่มการสั่นสะเทือนของของไหลภายในท่อซึ่งจะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนผ่านของไหลดีขึ้น 2) วิธีที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกมาช่วยในการถ่ายเทความร้อน (Passive technique) คือ การเพิ่มพื้นที่ผิวหรือติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนภายในท่อ เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลที่ปั่นป่วนมากขึ้นอันจะนำไปสู่การถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น เช่น การเพิ่มผิวสัมผัสของท่อในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [1-2] การติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวน [3-8] เป็นต้น

วิธีการแบบ Passive technique เป็นที่นิยมในการทำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ต้องการแหล่งพลังงานจากภายนอกมาช่วย แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะก่อให้เกิดความดันตกคร่อมในท่อมกมากขึ้นอันเป็นผลให้เกิดการสูญเสียมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการเลือกใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนจึงต้องมีความเหมาะสม ซึ่งพิจารณาถึงขนาด รูปร่าง การติดตั้ง และปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้นที่ความดันตกคร่อมที่ยอมรับได้

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมภายในท่อกลมเพื่อสร้างความปั่นป่วนของการไหลของอากาศในท่อ ซึ่งพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อน ความดันตกคร่อม และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ได้ โดยนำวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาใช้ในการศึกษาตัวแปรต่างๆภายในขอบเขตที่กำหนด ผ่านโปรแกรม Ansys FLUENT เพื่อความรวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำ ลดปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น และสามารถใช้เป็นแบบอย่างในการพัฒนางานวิจัยอื่นๆต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการนำแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่ติดตั้งไว้ภายในท่อกลม

2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหล ถ่ายเทความร้อน ความดันตกคร่อม และสมรรถนะเชิงความร้อนของของไหลภายในท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมไว้ภายในเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมต่อพฤติกรรมการไหล การถ่ายเทความร้อน ความดันตกคร่อม และสมรรถนะเชิงความร้อนของของไหล โดยปรับปรุงรูปร่างของแหวนทรงกรวยในรูปแบบต่างๆกัน

4. เพื่อพัฒนารูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน ลดค่าตัวประกอบเสียดทาน และเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้สูงขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ในการศึกษาจะใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล ผ่านการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Ansys FLUENT ซึ่งการถ่ายเทความร้อนอยู่บนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) โดยศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในรูปของเลขนัสเซิลท์และค่าตัวประกอบเสียดทาน

2. ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ

3. ศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์สตั้งแต่ 3,000 ถึง 20,000

4. ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable  $k-\epsilon$

5. ใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE ในกระบวนการคู่ควบของความเร็วและความดัน

6. ใช้การคำนวณแบบ QUICK ในเทอมของการพา

7. พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection)

8. ให้ความร้อนที่ผนังของท่อกลมแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่  $600 \text{ W/m}^2$

9. กำหนดให้แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีลักษณะเป็นแผ่นบางและไม่สามารถนำความร้อนได้

10. ทำการศึกษาแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมในรูปแบบต่างๆ ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- แบบแหวนทรงกรวยดั้งเดิมที่อัตราส่วนความกว้างทางเข้า  $D_{R,i} = 0.6$ , อัตราส่วนความกว้างทางออก  $D_{R,o} = 0.97$ , อัตราส่วนพิตช์  $P_R = 2.0$ , อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio,  $a_r$ ) = 1.0

- จากนั้นจึงปรับปรุงรูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมเพิ่มเติมตามแบบปรับปรุง 1, 2, 3 และ 4 เพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนให้ดียิ่งขึ้น

- ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความกว้างทางเข้าที่  $D_{R,i} = 0.5, 0.6$  และ  $0.7$

- ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความกว้างทางออกที่  $D_{R,o} = 0.95, 0.97$  และ  $0.99$  (สำหรับทรงหกและแปดเหลี่ยม) และ  $D_{R,o} = 0.79, 0.81$  และ  $0.83$  (สำหรับทรงสี่เหลี่ยม)

- ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ที่  $P_R = 1.5, 2.0, 2.5$  และ  $3.0$

- ศึกษาอัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ไฮดรอลิกของท่อกลม ( $l_E / D$ ) = 0.5, 1.0 และ 1.5

11. หารูปทรงของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่เหมาะสม ทั้งรูปร่างขนาด อัตราส่วนพิตช์ มุมปะทะ เพื่อเปรียบเทียบค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดจากการศึกษาครั้งนี้

12. หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งนำไปสู่การใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต ที่มีความเกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหล โดยการติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนรูปแบบต่างๆภายในท่อกลม
2. ตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบและการตั้งค่าแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหล โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองของนักวิจัยในอดีตว่ามีความถูกต้องแม่นยำ เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าผลลัพธ์ที่ออกมาจากแบบจำลองจะไม่ผิดพลาด
3. ออกแบบลักษณะรูปร่างของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่จะใช้จากการประยุกต์งานวิจัยในอดีต รวมทั้งตรวจสอบหาขนาดและจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสม
4. คำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการไหลสามมิติ โดยเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆ ได้แก่  $Re$ ,  $a_r$ ,  $D_{R,i}$ ,  $D_{R,o}$ ,  $P_R$ ,  $l_E / D$  และ  $\alpha$  โดยจัดรูปแบบของแหวนทรงกรวยให้เป็นแบบลู่ออก
5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขโดยเปรียบเทียบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ด้วยการแสดงกราฟเปรียบเทียบ
6. สรุปผลการวิจัยและให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

1. เกิดองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบเพิ่มตัวสร้างความปั่นป่วนภายในท่อกลม โดยใช้แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมรูปแบบต่างๆ
2. ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีการติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนแบบแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมรูปแบบต่างๆ
3. เพื่อการพัฒนาและออกแบบแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมรูปแบบต่างๆ ที่ติดตั้งภายในท่อกลมให้มีความเหมาะสม และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้สูงสุด
4. สามารถใช้เป็นแนวทางเพื่อการวิจัยการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนรูปทรงแหวนทรงกรวยและรูปทรงอื่นๆ ต่อไปได้
5. สร้างการประหยัดพลังงานและนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต
6. เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

## 1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้ได้นำเสนอรายละเอียดของเนื้อหาออกเป็น 6 บท โดยแต่ละบทประกอบด้วยรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้ บทที่ 1 เป็นการกล่าวนำเพื่อให้เข้าใจถึงที่มาและความสำคัญของการวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่ผู้ทำวิจัยคาดหวังว่าจะได้รับจากการทำการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการนำเสนองานวิจัยต่างๆที่ผ่านมาที่ได้ทำการศึกษาถึงการติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนภายในท่อกลม โดยมีรูปแบบและลักษณะการจัดวางตัวสร้างความปั่นป่วนในรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆและสมการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และสมรรถนะเชิงความร้อน เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและทำความเข้าใจในการวิจัยครั้งนี้

บทที่ 4 อธิบายรูปแบบการศึกษาจากการติดตั้งแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมในท่อกลม รวมทั้งวิธีการปรับปรุงรูปแบบต่างของตัวแหวนทรงกรวยเพื่อติดตั้งในท่อกลม โดยปรับเปลี่ยนค่าเลขเรย์โนลด์  $Re$ , อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก  $a_r$ , อัตราส่วนความกว้างทางเข้า  $D_{R,i}$ , อัตราส่วนความกว้างทางออก  $D_{R,o}$ , อัตราส่วนพิทช์  $P_R$ , อัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลม  $l_E/D$  และมุมปะทะ  $\alpha$  ที่กระทำต่อตัวแหวนทรงกรวย เพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทานลงให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

บทที่ 5 นำเสนอผลที่ได้จากการศึกษาทั้งค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน เมื่อติดตั้งแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมในท่อกลมในรูปแบบต่างๆ และท้ายสุดคือ

บทที่ 6 แสดงการสรุปผลจากการศึกษาทั้งหมดและข้อเสนอแนะต่างๆเพิ่มเติมในการต่อยอดงานวิจัย ซึ่งจะถูกรวบรวมไว้ในบทนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์

### 2.1 กล่าวนำ

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนในท่อกลมนั้นสามารถทำได้หลายหลายวิธี การติดตั้งแหวนทรงกรวยกับท่อกลม นับเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมากวิธีหนึ่งดังปรากฏในงานวิจัยในอดีต [9-19] ถึงแม้ว่าตัวสร้างความปั่นป่วนแบบแหวนกรวยนี้จะช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น แต่ความต้านทานการไหลก็เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกันและเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องปรับปรุงแก้ไขอยู่เสมอ จึงเกิดแนวความคิดการประยุกต์แหวนกรวยนี้ให้มีรูปร่างเป็นแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่มีรูปร่างคล้ายคลึงกันซึ่งช่วยลดพื้นที่ขวางการไหลลง และคาดหวังว่าจะสามารถลดความดันตกคร่อมให้ลดน้อยลงได้ จึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษางานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาและปรับปรุงตัวสร้างความปั่นป่วนรูปทรงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมนี้ด้วยหลักการที่ถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

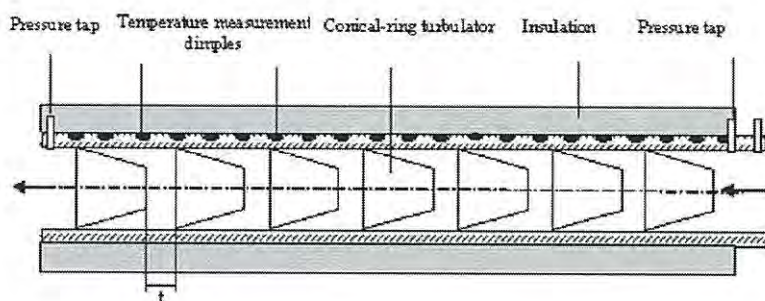
#### 2.2.1 Fully developed flow and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of cross-sectional area [9]

ในปี 1977 Patankar และคณะ ได้ริเริ่มศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์การไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อตามแนวขวาง โดยจากการศึกษาพบว่าการไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์มีพฤติกรรมการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกันและซ้ำกันทุกๆ ช่วงของการไหล ซึ่งสามารถนำแนวความคิดนี้มาพัฒนาในการใช้แบบจำลองวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนต่างๆ ได้อย่างมากมาย

#### 2.2.2 Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers [10]

Yakut และ Sahin ได้ศึกษาคุณลักษณะการสั่นเหนี่ยวนำการไหลของแหวนทรงกรวยที่ใช้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สนใจขึ้นในปี 2004 โดยการทดสอบออกแบบระยะพิทซ์ไว้ที่ 10, 20 และ 30 มม. และนำมาติดตั้งที่ภายในของกลุ่มท่อดังรูปที่ 2.1 โดยมีของไหลทดสอบเป็นอากาศไหลผ่านภายในท่อ

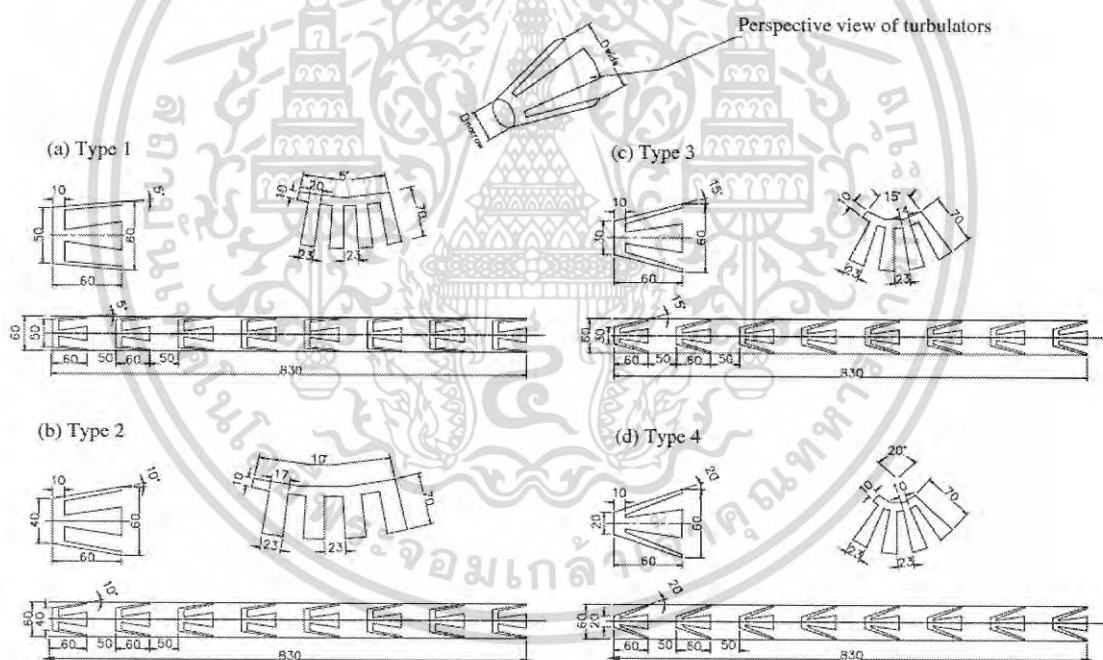
จากผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อติดตั้งแหวนทรงกรวยกับท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการไหลที่ปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าแต่ก็ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานที่สูงขึ้นเช่นกัน โดยปัจจัยที่ต้องพิจารณาต่อไปคือขนาดและน้ำหนักของแหวนทรงกรวยนี้เพื่อให้การใช้แหวนทรงกรวยนี้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [10]

### 2.2.3 Heat transfer and exergy loss in cut out conical turbulators [11]

และในปี 2004 เช่นเดียวกัน Durmus ได้ศึกษาถึงอิทธิกรตัดส่วนของแหวนทรงกรวยที่ติดตั้งอยู่ภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิผิวท่อคงที่ ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์ส์ 15,000-60,000 โดยนำผลของการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้มาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งแหวนทรงกรวย

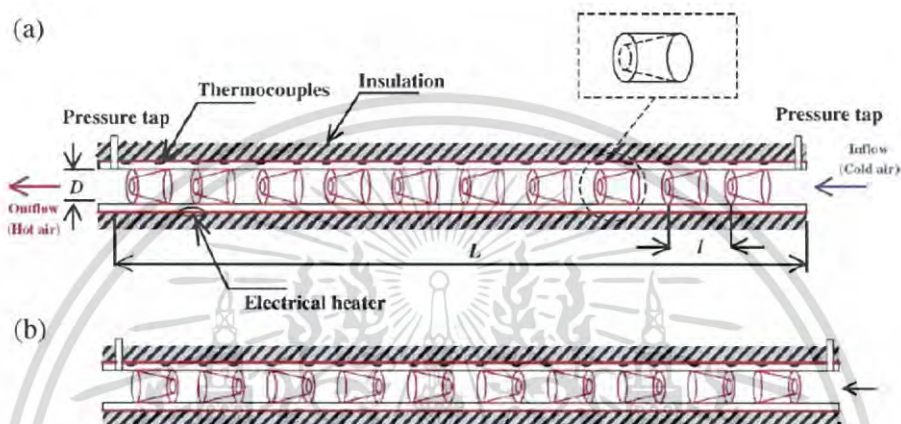


รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการตัดและขนาดของแหวนทรงกรวย [11]

เมื่อนำสมการมาใช้ในการวิเคราะห์ผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าแหวนทรงกรวยมีความสัมพันธ์อย่างมากต่อค่าการถ่ายเทความร้อนที่มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการจัดวางตัวสร้างการไหลหมุนวนลงไปในพื้นที่การไหลของของไหลจะทำให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นสิ่งสำคัญที่ควรนำมาปรับเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการใช้งานคือค่าความดันตกคร่อม เนื่องจากค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นมาจะส่งผลให้ต้องใช้กำลังปั๊มที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปจะทำการศึกษาถึงผลกระทบของจำนวนตัวสร้างการไหลหมุนวนที่ติดตั้งในท่อเรือนไฟและท่อคว้นในหม้อน้ำ (boiler) ซึ่งเป็นส่วนของก๊าซที่มีความร้อนมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 Heat transfer and turbulent flow friction in a circular tube fitted with conical-nozzle turbulators [12]

ในปี 2007 Promvonge และ Eiamsa-ard ได้ศึกษาอิทธิพลของแหวนทรงกรวยต่อค่าของการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเมื่อนำไปติดตั้งภายในท่อกลม โดยมีการจัดวางสองรูปแบบได้แก่ แบบลู่ออก (D-nozzle turbulator) และแบบลู่เข้า (C-nozzle turbulator) มีการจัดวางที่ระยะพิตช์ ( $P_R$ ) เท่ากับ 2.0, 4.0 และ 7.0 เลขเรย์โนลด์สขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉลี่ยของอากาศ โดยอยู่ในช่วง 8,000-18,000



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวย (a) จัดวางแบบ C-nozzle และ (b) จัดวางแบบ D-nozzle [12]

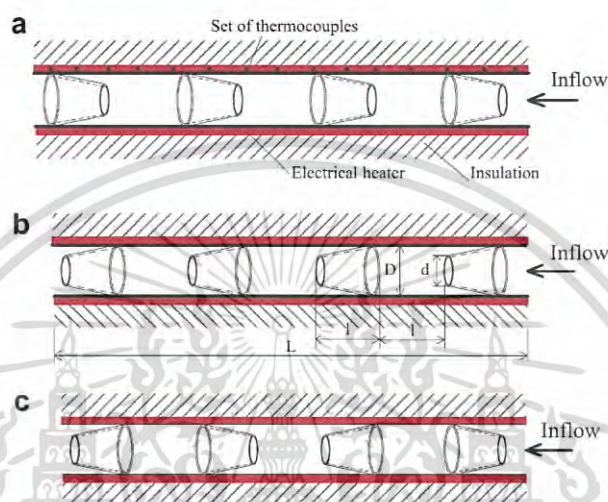
ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์สเพิ่มมากขึ้นจะมีผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้นตามการไหลที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าตัวประกอบเสียดทานจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อลดระยะพิตช์และเลขเรย์โนลด์สลง การจัดวางแบบ D-nozzle สามารถสร้างการไหลปั่นป่วนได้มากและให้ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมถึงตัวประกอบเสียดทานมากกว่าการจัดวางแบบ C-nozzle โดยค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการเพิ่มแหวนทรงกรวยนี้มีค่าเท่ากับ 236%-344% เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์สและการจัดวางแหวนทรงกรวย

## 2.2.5 Heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts [13]

ต่อมาในปี 2008 Promvonge ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยไว้ภายในท่อโดยมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางแหวนทรงกรวยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $d/D$ ) ที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 ซึ่งมีการจัดวางแหวนทรงกรวยทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ CR, DR และ CDR ดังรูปที่ 2.4 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบในช่วงของเลขเรย์โนลด์ส 6,000-26,000 โดยให้พารามิเตอร์ความร้อนที่ผิวท่อมีค่าคงที่

ผลการทดลองที่ได้จากการติดตั้งแหวนทรงกรวยไว้ภายในท่อส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากการจัดวางแบบ DR, CDR และ CR ที่  $d/D = 0.7-0.5$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น 197-333%, 138-234 และ 91-175% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า อย่างไรก็ตามการเพิ่มสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

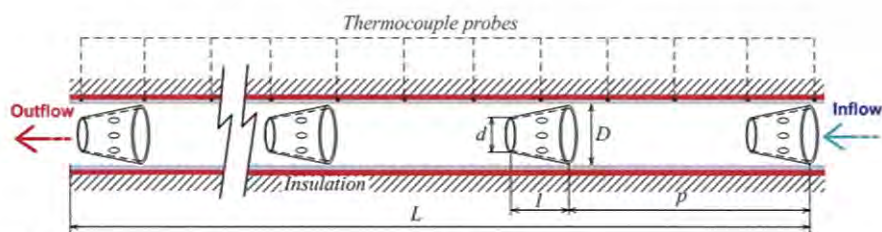
ได้เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยหากพิจารณาที่เลขเรย์โนลด์ส์ค่าเดียวกันจะพบว่าทั้งเลขนัสเซิลท์และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะลดลงเมื่อลดค่า  $d/D$  ลง ซึ่งค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบ DR และ CR ที่  $d/D = 0.5, 0.6$  และ  $0.7$  มีค่าเท่ากับ 1.8 และ 1.15, 1.76 และ 1.13 และ 1.73 และ 1.12 ตามลำดับ ขณะที่การจัดวางแบบ CDR มีค่าสูงสุดอยู่ระหว่างแบบ DR และ CR สามารถสรุปได้ว่าการติดตั้งแหวนทรงกลมในท่อกลมนี้ช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นในขณะที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวย (a) จัดวางแบบ DR (b) จัดวางแบบ CR (c) จัดวางแบบ CDR [13]

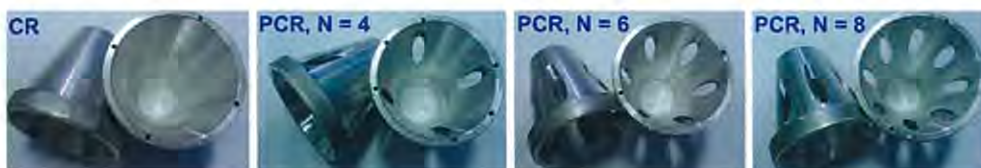
## 2.2.6 Experimental investigation of heat transfer and turbulent flow friction in a tube fitted with perforated conical-rings [14]

ในปี 2010 Kongkaitpaiboon และคณะ ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบเจาะรู (Perforated conical-ring, PCR) ที่อัตราส่วนพิทช์ = 4, 6 และ 12 จำนวนรูที่เจาะ = 4, 6 และ 8 รู โดยทดลองที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์ส์ระหว่าง 4,000-20,000 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบและกำหนดให้พลักซ์ความร้อนที่ผนังท่อกลมมีค่าคงที่



รูปที่ 2.5 แสดงการจัดวางแหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรูแบบตามกระแสรอบไหล [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของแหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรู [14]

ผลการทดลองที่ได้จากการติดตั้งแหวนทรงกรวย PCRs ในท่อกลมเมื่อเทียบกับแบบแหวนทรงกรวยปกติ CRs พบว่าที่สภาวะเดียวกันแหวนทรงกรวยแบบ PCRs ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่าแบบ CRs แต่ในขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกลับลดลงเหลือเพียง 25% ของแหวนแบบ CRs ซึ่งส่งผลให้แบบ PCRs ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบ CRs

อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแหวนทรงกรวยแบบ PCRs เพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดของอัตราส่วนพิทช์และจำนวนรูที่เจาะลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับจำนวนรูเจาะที่มากขึ้นและอัตราส่วนพิทช์ที่ลดลง

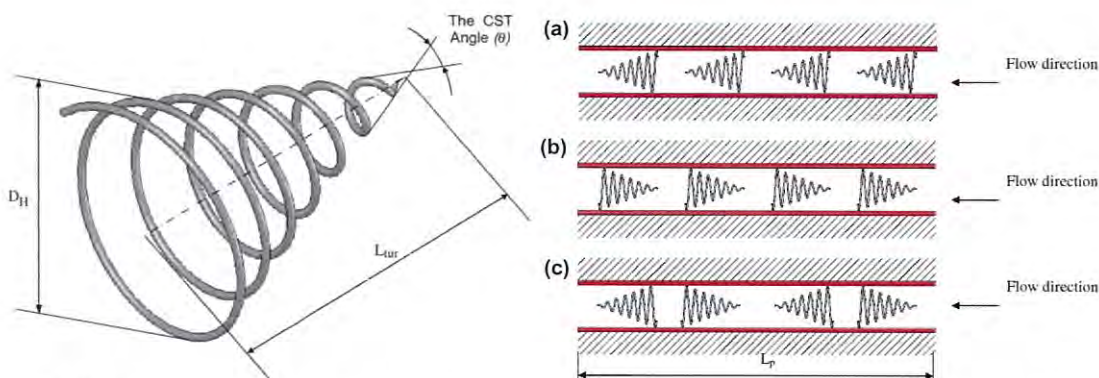
อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากแหวนทรงกรวย PCRs ที่อัตราส่วนพิทช์ 4, 6 และ 12 มีค่าเท่ากับ 185%, 140% และ 86% เทียบกับท่อเปล่า ตามลำดับ โดยที่สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 0.92 ที่อัตราส่วนพิทช์เท่ากับ 4 รูเจาะเท่ากับ 8 รู ที่เลขเรย์โนลด์สเท่ากับ 4,000

### 2.2.7 Experimental research on heat transfer of water in tube with conical ring inserts in transient regime [15]

Anvari และคณะ ได้ศึกษาพฤติกรรมการพาแบบบังคับของน้ำในแนวตัดขวางกับท่อที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยไว้ภายในชั้นในปี 2011 โดยมีการจัดวางแหวนทรงกรวยสองรูปแบบคือแบบลู่ออกหรือ CR และแบบลู่ออกหรือ DR พบว่าการสอดใส่ตัวสร้างความปั่นป่วนภายในท่อสามารถเพิ่มค่าเลขนัสเซลท์ในการจัดวางแบบ DR ได้ถึง 521% และแบบ CR เพิ่มได้ 355% เมื่อเทียบกับแบบท่อที่ยังไม่เพิ่มตัวสร้างความปั่นป่วน แต่อย่างไรก็ตามความดันตกคร่อมได้เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยผู้วิจัยได้แนะนำเพิ่มเติมว่าการลดค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมานี้ควรใช้วิธีลดขนาดของตัวสร้างความปั่นป่วนมากกว่าที่จะเพิ่มกำลังปั๊มในการขับเคลื่อนของไหล

### 2.2.8 Heat transfer and exergy loss in conical spring turbulators [16]

นอกจากนี้ในปี 2013 Durmus และ Karakaya ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงรูปแบบของแหวนทรงกรวยในรูปแบบของแหวนสปริงทรงกรวย (Conical spring turbulators, CST) โดยพิจารณาที่มุมของแหวนสปริงเท่ากับ 30, 45 และ 60 องศา ที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์ส 10,000-34,000 และมีการจัดวางรูปแบบของแหวนสปริงได้แก่แบบ DR, CR และ CDR ดังรูปที่ 2.7

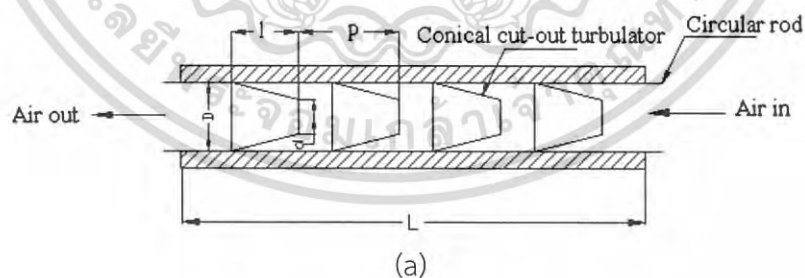


รูปที่ 2.7 รูปทรงของแหวนสปริงทรงกรวย และรูปแบบการจัดวางแบบ DR, CR และ CDR [16]

การถ่ายเทความร้อนของแหวนสปริงทรงกรวยเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยคือการจัดวางแบบ DR, CDR และ CR ตามลำดับ และผลจากมุมที่ตัวของแหวนสปริงที่ให้ผลการถ่ายเทความร้อนจากมากไปน้อยได้แก่ 30, 45 และ 60 องศา ตามลำดับ แม้ว่าการใส่แหวนสปริงจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น แต่ความดันตกคร่อมก็ได้เพิ่มสูงตามไปด้วย ซึ่งต้องมีการปรับค่าที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

### 2.2.9 Effect of conical cut-out turbulators with internal fins in a circular tube on heat transfer and friction factor [17]

และในปี 2013 Muthusamy และคณะ ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งกรวยแบบมีครีบริบติดอยู่ด้านใน ที่อัตราส่วนพิตซ์เท่ากับ 3, 4 และ 5 โดยทดสอบที่การจัดวางสองรูปแบบคือแบบลู่เข้า (C-turbulators) และแบบลู่ออก (D-turbulators) มีอากาศเป็นของไหลทดสอบที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 6,800-9,700 ภายใต้ฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่  $0.052 \text{ w/m}^2$  โดยเปรียบเทียบผลการทดลองจากท่อเปล่ากับการจัดวางแบบ C-turbulators และ D-turbulators



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

(c)

รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวย (a) รูปแบบชุดทดลอง (b) จัดวางแบบ C-Type (c) จัดวางแบบ D-Type [17]

ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ได้จากการจัดวางแบบ C-Type และ D-Type ที่อัตราส่วนพิตช์เท่ากับ 3 คือ 315% และ 225% สมรรถนะเชิงความร้อน คือ 2.4 และ 1.9 ตามลำดับ ส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็น 3.2 และ 2.8 เท่าเทียบกับท่อเปล่า ในการจัดวางแบบ D-Type และ C-Type ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ชี้ให้เห็นว่าการจัดวางแบบ D-Type ที่อัตราส่วนพิตช์เท่ากับ 3 มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนพิตช์อื่นๆ

#### 2.2.10 Numerical and experimental investigation of heat transfer behavior in a round tube with the special conical ring inserts [18]

ถัดมาในปี 2014 Anvari และคณะ ยังได้ศึกษาถึงอิทธิพลจำนวนแหวนของแหวนทรงกรวยเพื่อตรวจสอบถึงค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมภายในท่อกลมโดยที่ลักษณะความร้อนคงที่ โดยจัดวางแหวนทรงกรวยทั้งหมดสองรูปแบบได้แก่ แบบลู่เข้า (Converging conical ring, CR) และแบบลู่ออก (Diverging conical ring, DR) โดยการศึกษาเชิงตัวเลขครั้งนี้ใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมในการหาผลลัพธ์

ผลการศึกษาที่ได้พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่าผิวเรียบจะขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ส์ แต่ในกรณีศึกษาครั้งนี้ค่าตัวประกอบเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ส์ ค่าของเลขนัสเซลท์ที่ได้จากการทดลองจะแปรผกผันกับค่าเลขเรย์โนลด์ส์ รวมไปถึงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนก็ให้ผลลัพธ์ที่ผกผันกับเลขเรย์โนลด์ส์เช่นกัน โดยค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากการจัดวางแบบ DR ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการจัดวางแบบ CR แต่ว่าทั้งสองกรณีกลับให้ผลของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่น้อยกว่าแบบดั้งเดิม

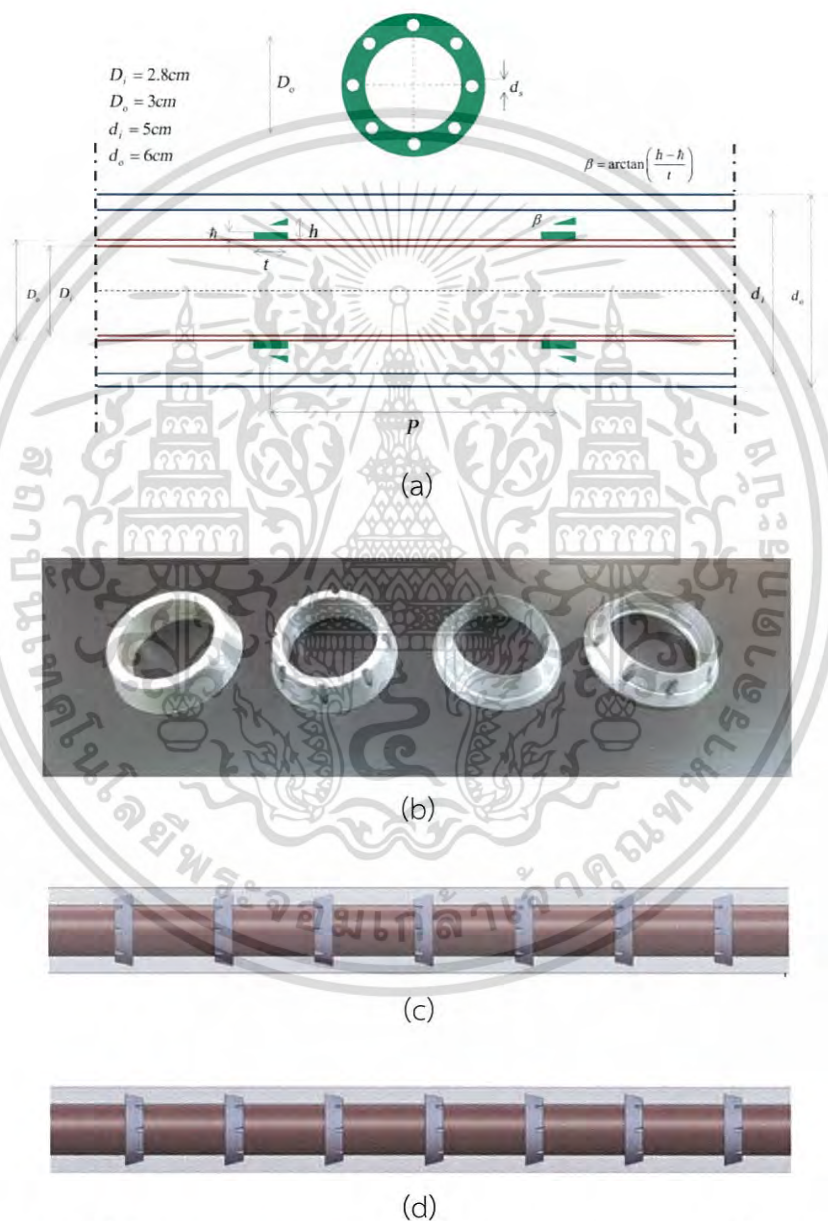
#### 2.2.11 Experimental and numerical analysis for effects of using conical ring on turbulent flow and heat transfer in a double pipe air to water heat exchanger [19]

ในปี 2016 Sheikholeslami และคณะ ได้ศึกษาอิทธิพลของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมและแบบเจาะรูที่มีผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนของอากาศที่มีต่อน้ำในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Double pipe heat exchanger) ที่มีการจัดวางแหวนทรงกรวยสองรูปแบบคือแบบ Direct conical ring, DCR และแบบ Reverse conical ring, RCR โดยทดลองที่อัตราส่วนของพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปิด 0-0.0833 ช่วงของเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 6,000-12,000 มุมของแหวนทรงกรวยตั้งแต่ 0-30 องศา และอัตราส่วนพิตซ์ 1.83-5.83

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการใส่แหวนทรงกรวยที่เจาะรูในชุดทดลองนั้นสามารถลดชั้นของความร้อนที่ผิวท่อให้บางลงได้ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเพิ่มของค่าเลขนัสเซลท์ และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนพื้นที่เปิดเพิ่มมากขึ้น อัตราส่วนพิตซ์ที่ต่ำๆ และเลขเรย์โนลด์สูงๆ และยังพบว่าการจัดวางแบบ DCR จะให้ผลของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากขึ้นเมื่อเพิ่มมุมของแหวนทรงกรวยแต่การจัดวางแบบ RCR จะให้ผลที่ตรงข้ามกัน



รูปที่ 2.9 (a) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องและรูปแบบของชุดทดลอง (b) แหวนทรงกรวยที่เจาะรู (c) การจัดวางแบบ DCR (d) การจัดวางแบบ RCR [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าการติดตั้งแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถสร้างความปั่นป่วนให้แก่การไหลได้ ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบซี่ทวนกระแสการไหลให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการจัดวางแหวนทรงกรวยในแบบอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามการติดตั้งแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมยังทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ได้จึงไม่สูงนัก จึงเป็นสาเหตุหลักในงานวิจัยนี้โดยทำการปรับปรุงรูปแบบของแหวนทรงกรวยให้เป็นแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมเพื่อเป็นการลดค่าความดันตกคร่อมลง

ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทดลองครั้งนี้ โดยทำการปรับปรุงทำมุมปะทะของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมเพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทาน เพิ่มการกระจายการไหลและการถ่ายเทความร้อนของของไหลให้มากขึ้น ปรับอัตราส่วนระยะความสูงต่อความกว้าง (aspect ratio) ทั้งด้านทางเข้าและทางออก รวมถึงระยะพิตช์ การตัดทำมุมปะทะที่ตัวแหวนทรงกรวย และอัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อกลม เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหลสูงที่สุดและเป็นการขยายข้อมูลในการศึกษาท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม และเพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้ใช้งานในการตัดสินใจเลือกใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนได้ตามความเหมาะสม เป็นประโยชน์ในเชิงการเพิ่มองค์ความรู้ใหม่และเป็นข้อมูลเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีต่อไปในอนาคตสำหรับผู้สนใจออกแบบปรับปรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำไปสู่การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดการสูญเสียให้น้อยที่สุด งานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจทั่วไปรวมถึงภาคอุตสาหกรรม ทำให้การใช้พลังงานและทรัพยากรมีความคุ้มค่า มีประสิทธิภาพ สามารถลดต้นทุนในการผลิตในด้านอุตสาหกรรม ซึ่งจะเป็นประโยชน์โดยตรงในเชิงเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม

## บทที่ 3

# สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการต่างๆและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยเจาะจงพิจารณาที่การถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลม ค่าความดันตกคร่อม ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของของไหล และวิเคราะห์ผลลัพธ์รวมถึงปัญหาที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมหรือไฟไนท์วอลุ่ม (finite volume) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับกันมากในปัจจุบัน สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาการไหลผ่านรูปทรงที่มีความซับซ้อนได้และมีความแม่นยำ อีกทั้งยังนำไปประยุกต์ใช้ได้โดยไม่ยุ่งยากและแสดงผลได้หลากหลาย

### 3.2 สมมุติฐานและสมการในการคำนวณ

จากการวิจัยได้ศึกษาโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) โดยมีสมมุติฐานในการศึกษาดังนี้

1. ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ
2. เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและของไหลอัดตัวไม่ได้
3. แบบจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
4. เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วง
5. คุณสมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่
6. ไม่คำนึงแรงวัตถุและการสูญเสียเนื่องจากความหนืด
7. ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน
8. ให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังท่อ

### 3.3 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น

การศึกษากลศาสตร์ของไหลมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อชีวิตประจำวัน รวมถึงในทางพัฒนาเชิงอุตสาหกรรมด้วย ไม่ว่าจะเป็นเครื่องอำนวยความสะดวก เครื่องมือเครื่องใช้และเครื่องจักรต่างๆ รวมถึงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมนั้น จะเห็นได้ชัดว่าล้วนประกอบไปด้วยการใช้งานของไหลแทบทั้งสิ้น เช่นระบบปรับอากาศ ระบบระบายน้ำและอากาศ อุตสาหกรรมผลิตอาหาร เป็นต้น ดังนั้นพื้นฐานความรู้ในวิชากลศาสตร์ของไหลจึงมีความจำเป็นสำหรับการคำนวณการออกแบบและประยุกต์ระบบเพื่อให้มีการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

#### 3.3.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์ของไหล

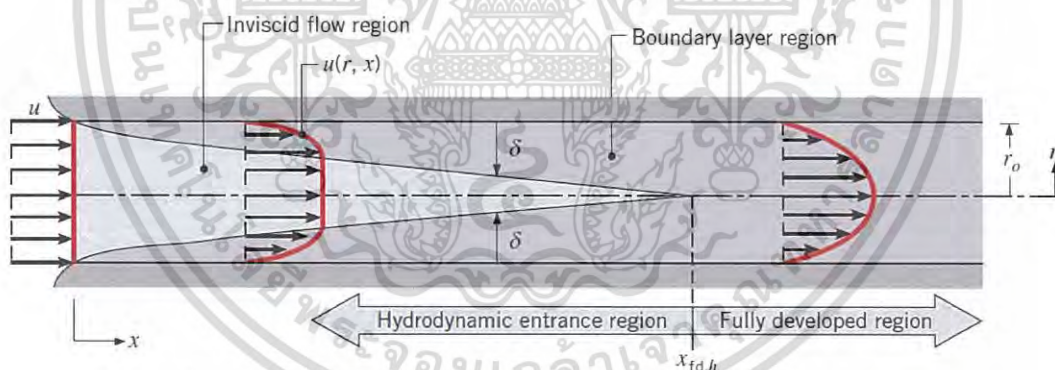
ของไหล (Fluid) หมายถึงของเหลวและก๊าซ ในการวิเคราะห์จะต่างกันตรงที่ก๊าซจะเป็นของไหลที่สามารถอัดตัวได้ ส่วนของเหลวนั้นไม่สามารถอัดตัวได้ ถึงแม้จะอัดตัวได้บ้างแต่ต้องใช้ความดันสูงมาก จึงพิจารณาว่าของเหลวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ของไหลอัดตัวได้คือของไหลที่ความหนาแน่นไม่คงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด เช่น ก๊าซอยู่ในภาชนะปิดสนิทเมื่อได้รับความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของก๊าซจะเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามถ้าสูญเสียความร้อนความหนาแน่นจะลดลง ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะของไหลที่อัดตัวไม่ได้เท่านั้น

- ความหนาแน่น (Density,  $\rho$ ) คือ มวล ( $m$ ) ของสารนั้นๆ หารด้วยปริมาตร ( $V$ )
- ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume,  $v$ ) คือ ปริมาตรของสารนั้นๆ หารด้วยมวล ซึ่งจะมีค่าเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น
- ความหนืด (Viscosity,  $\mu$ ) คือ คุณสมบัติการต้านการเคลื่อนที่ของของไหล
- น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight,  $\gamma$ ) คือ ความหนาแน่นคูณกับค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $g$ ) หรือน้ำหนัก ( $mg$ ) หารด้วยปริมาตร

### 3.3.2 การไหลแบบราบเรียบหรือการไหลเป็นชั้นๆ (Laminar Flow) กับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

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



รูปที่ 3.1 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลผ่านผิวของวัตถุ [20]

ชั้นขอบเขตของการไหลนี้จะแบ่งออกเป็นชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) กับชั้นขอบเขตของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) การไหลภายในชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบนั้นจะมีเส้นของการไหลอย่างเป็นระเบียบเกิดขึ้น ในการจำแนกการไหลว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือเป็นการไหลแบบปั่นป่วน สามารถแยกได้โดยใช้ตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า “เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds Number,  $Re$ )” เป็นตัวกำหนดในการแยกการไหลโดย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $V$  คือ ความเร็วในการไหล,  $L$  คือ ความยาวตลอดช่วงการไหล และ  $\nu$  คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลนศาสตร์

เนื่องจากเลขเรย์โนลด์สเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างแรงขับเคลื่อนของการไหลต่อความหนืด ดังนั้นจะเห็นว่าถ้าเลขเรย์โนลด์สมีค่ามากก็สามารถแสดงเป็นเชิงสัมพันธ์ให้เห็นว่าผลกระทบ (Effect) ของค่าความหนืดจะมีค่าน้อย เลขเรย์โนลด์สที่อยู่ในระหว่างเปลี่ยนจากการไหลแบบเป็นชั้นไปสู่การไหลแบบปั่นป่วนนั้นเรียกว่า “เลขเรย์โนลด์สวิกฤติ (Critical Reynolds,  $Re_c$ )”

### 3.3.3 การไหลในท่อกลม

การไหลในท่อกลมที่บริเวณทางเข้าท่อที่แสดงในรูปที่ 3.2 นั้นจะเห็นว่าตั้งแต่ที่บริเวณทางเข้า ชั้นขอบเขตของความเร็วจะค่อยๆ พัฒนาเพิ่มขึ้นทีละเล็กทีละน้อยจนถึงระยะทางค่าหนึ่ง ( $L_E$ ) ชั้นของความเร็วจะซ้อนกันทั้งบนและล่าง หลังจากนั้นการกระจายความเร็วจะไม่มีเปลี่ยนแปลง เรียกว่าการไหลได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์ (Fully Developed) เลขเรย์โนลด์ส  $Re$  สำหรับการไหลภายในท่อนั้นถ้าให้  $V$  เป็นค่าความเร็วเฉลี่ย  $D$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของพื้นที่ตัดขวางท่อแล้วจะได้

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (3.2)$$

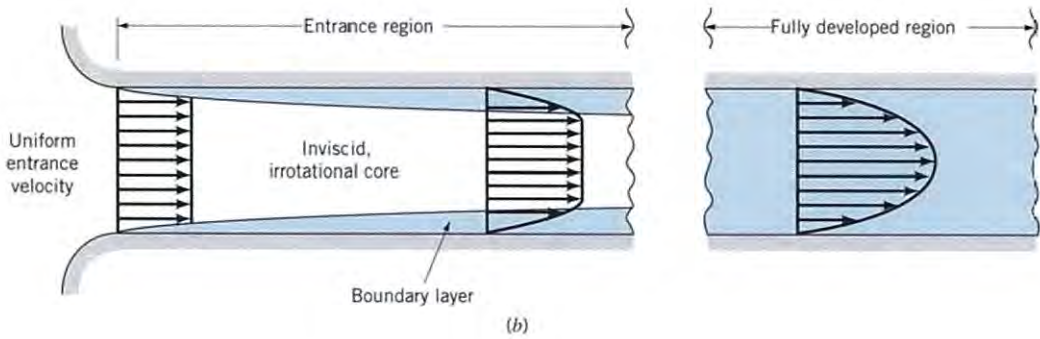
อนึ่งค่า  $\rho\nu$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] จะเป็นค่าการไหลของมวลสารต่อพื้นที่หน้าตัดในการไหล สำหรับในกรณีของก๊าซนั้น การเพิ่มความร้อนภายในท่อจะทำให้ก๊าซขยายตัวมีความเร็ว  $V$  เพิ่มขึ้น ค่า  $\rho V$  จะไม่เปลี่ยนแปลงถ้าพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่ นอกจากนั้นโดยปกติจะถือว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด  $\mu$  จะไม่เปลี่ยนแปลงไปกับความดันอีกด้วย ส่วนค่าความหนืดเชิงจลนศาสตร์  $\nu$  ซึ่งเท่ากับ  $\mu/\rho$  ในกรณีของก๊าซจะเป็นค่าที่ผกผันกับความดันซึ่งจะต้องระมัดระวัง

เมื่อ  $D$  คือความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหลหรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) มีนิยามเป็น

$$D = \frac{4A_c}{P} \quad (3.3)$$

เมื่อค่า  $A_c$  และ  $P$  เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของหน้าตัดตามลำดับ

เลขเรย์โนลด์สวิกฤติ  $Re_c$  ของการไหลภายในท่อที่ได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์แล้ว คือเลขเรย์โนลด์สที่การไหลเปลี่ยนจากการไหลราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่า  $Re_c = 2,300$  หรืออยู่ในช่วงระหว่าง 2,000 – 4,000 โดยประมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนในการไหล ความขรุขระภายในท่อที่ไหล หรือรูปทรง และสภาพของทางเข้า ส่วนเลขเรย์โนลด์สที่ต่ำกว่า 2,000 ไม่ว่าท่อจะมีความยาวมากเพียงใด การไหลก็จะไม่เปลี่ยนแปลงไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน จะยังคงรักษาสภาพการไหลแบบเป็นชั้น หรือราบเรียบต่อไป โดยรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นการกระจายความเร็วที่ได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์การกระจายความเร็วจะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ



รูปที่ 3.2 การไหลอย่างสมบูรณ์ภายในท่อกลม

โดยทั่วไปสำหรับการไหลในท่อผิวเรียบ เลขเรย์โนลด์สวิกฤติของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลปั่นป่วน เริ่มต้นจาก  $Re_D > 4,000$  และความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวเข้าสู่ช่วงสมบูรณ์หาได้จากสมการ

$$\left(\frac{L_e}{D}\right)_{turb} \approx 4.4 Re_D^{1/6} \quad (3.4)$$

### 3.3.4 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทาน (friction factor) ของ Moody หรือ Darcy ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติ มีนิยามว่า

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

เมื่อค่า  $L$  คือช่วงความยาวที่วัดค่าความดันตกคร่อม และค่า  $f_{Darcy}$  นี้แตกต่างกับค่าตัวประกอบความเสียดทาน  $f$  ซึ่งเรียกว่าตัวประกอบความเสียดทานเพนนิ่ง มีสมการดังนี้

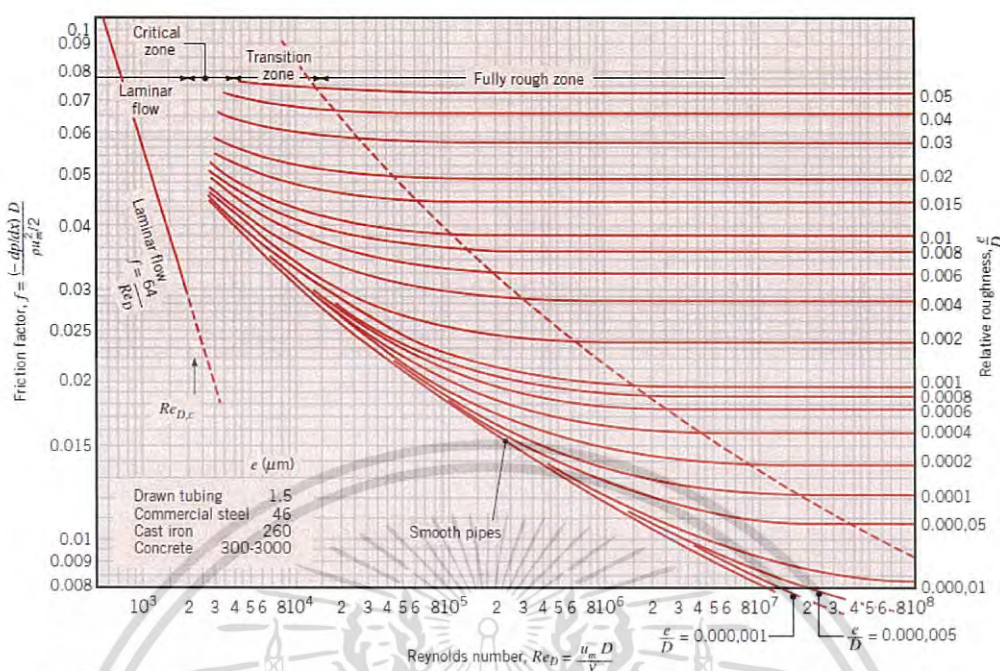
$$f = \frac{f_{Darcy}}{4} \quad (3.6)$$

สหสัมพันธ์สำหรับการไหลผ่านวัสดุพื้นผิวเรียบที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์สูงๆ จากการพัฒนาของ Petukhov สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$f = (0.79 \ln Re_D - 1.64)^{-2} \quad (3.7)$$

ในช่วงของเลขเรย์โนลด์สที่  $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$

และตารางแสดงความสัมพันธ์ของตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สหรือ Moody diagram สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลแบบสมบูรณในท่อกลม [20]

### 3.4 การพาความร้อน

#### 3.4.1 หลักการพื้นฐานของการพาความร้อน

การพาความร้อน หมายถึง การถ่ายเทความร้อนในการอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล โดยมากการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุมักจะสำคัญกว่าการถ่ายเทความร้อนภายในตัวของไหลเอง ในที่นี้ จึงจะกล่าวถึงการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าว การพาความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งจากการไหลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือความหนาแน่น) และการไหลที่เกิดขึ้นจากส่งกำลังเข้าช่วย เช่น บั้มหรือพัดลม เป็นต้น ซึ่งแบบแรกจะเรียกว่า การพาความร้อนตามธรรมชาติ และแบบหลังจะเรียกว่าการพาความร้อนด้วยการบังคับ

#### 3.4.2 ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน

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

โดยฟลักซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \tag{3.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $T_s$  คืออุณหภูมิพื้นผิว

$T_m$  คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

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

### 3.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

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

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

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

กล่าวคือ  $Nu$  สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันของ  $Re$  กับ  $Pr$

### 3.4.4 ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน

ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนหรือค่าสมรรถนะเชิงความร้อน,  $TEF$  ซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้รับ สามารถคำนวณได้จาก

$$TEF = \frac{(Nu / Nu_0)}{(f / f_0)^{1/3}} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $Nu$  คือ ค่าเลขนัสเซลล์ท์จากการถ่ายเทความร้อนที่ได้

$Nu_0$  คือ ค่าเลขนัสเซลล์ท์จากท่อเปล่าผิวเรียบ

$f$  คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ได้

$f_0$  คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานจากท่อเปล่าผิวเรียบ

## 3.5 การคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง

สำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่วงที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์นี้ การลดจำนวนกริดเซลล์และเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพื่อลดภาระงานให้น้อยลงในขณะที่ผลการทดลองยังมีความแม่นยำ จะใช้วิธีการคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง (periodic flow) มาช่วย ซึ่งการวิเคราะห์การไหลลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อรูปทรงที่ใช้เป็นทรงเรขาคณิต โดยรูปแบบที่ต้องการหาค่าผลเฉลยของการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยธรรมชาติแล้วจะมีการซ้ำเป็นช่วงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงนี้สามารถแบ่งได้เป็นการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วและการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 3.5.1 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว

การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วเป็นลักษณะการไหลเมื่อมีค่าความดันตกคร่อมเกิดขึ้นข้ามขอบเขตการไหลตามแนวทิศทางการไหลและเกิดขึ้นกับการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์แล้ว ลักษณะการไหลเช่นนี้มีการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตที่ซ้ำกันต่อกันไปตามแนวทิศทางการไหลและเกิดขึ้นซ้ำกันเป็นวงรอบเรื่อยไป สภาวะการไหลที่ซ้ำเป็นช่วงนี้เกิดขึ้นหลังจากมีช่วงของความยาวขาเข้าที่เพียงพอ โดยขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์สของการไหลและรูปร่างทางเรขาคณิตของช่องทางไหล

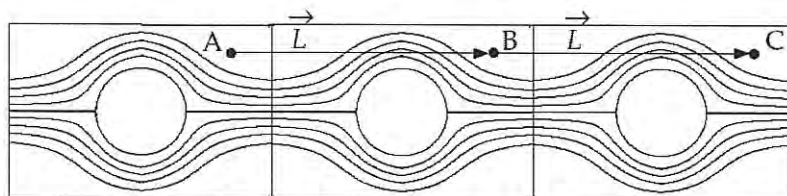
#### 3.5.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

สภาวะของการไหลซ้ำเป็นช่วงเกิดขึ้นดังกล่าวมานั้น เมื่อรูปแบบการไหลเกิดขึ้นซ้ำกันในช่วงการไหล  $L$  โดยมีค่าความดันตกคร่อมคงที่ในช่วงโมดูลนั้นๆ ตามแนวทิศทางการไหล นิยามของการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วถูกกำหนดโดยค่าของความเร็วย่อยนั้นจะซ้ำกันโดยตัวมันเอง ดังสมการ

$$u_i(\bar{r}) = u_i(\bar{r} + \bar{L}) = u_i(\bar{r} + 2\bar{L}) = \dots \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\vec{r}$  คือเวกเตอร์บอกตำแหน่ง และค่า  $\vec{L}$  คือเวกเตอร์ของความยาวที่ซ้ำเป็นช่วงของขอบเขตการไหลที่พิจารณา แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง

จากรูปสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$u_A = u_B = u_C \quad \tilde{p}_A = \tilde{p}_B = \tilde{p}_C$$

$$v_A = v_B = v_C \quad p_B - p_A = p_C - p_B$$

### 3.5.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

สำหรับการไหลแบบมีความหนืดร่วมด้วยนั้น ค่าของความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นจะไม่ซ้ำเป็นช่วงตามนิยามของความเร็ว แต่ค่าของความดันตกคร่อมช่วงของการไหลหรือโมดูลนั้นๆ จะยังคงมีค่าเท่ากัน สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta p = p(\vec{r}) - p(\vec{r} + \vec{L}) = p(\vec{r} + \vec{L}) - p(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \quad (3.16)$$

ค่าเกรเดียนต์ของความดันเฉพาะที่สามารถแยกออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนของเกรเดียนต์ที่ซ้ำเป็นช่วง,  $\nabla \tilde{p}(\vec{r})$  และส่วนของเกรเดียนต์ของการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น,  $\beta \frac{\vec{L}}{|\vec{L}|}$  โดยแสดงได้ดัง

สมการ

$$\nabla p(\vec{r}) = \beta \frac{\vec{L}}{|\vec{L}|} + \nabla \tilde{p}(\vec{r}) \quad (3.17)$$

เมื่อค่า  $\tilde{p}(\vec{r})$  คือความดันที่ซ้ำกันเป็นช่วง (periodic pressure) และค่า  $\beta|\vec{r}|$  คือส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดัน โดยที่ค่าความดันที่ซ้ำกันเป็นช่วงคือผลต่างของความดันทางด้านทางเข้ากับความดันที่ด้านทางออกที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น และส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดันเป็นผลของแรงที่กระทำต่อของไหลในสมการโมเมนตัม ซึ่งค่า  $\beta$  นั้นจะเป็นค่าที่ไม่ทราบมาก่อนและจะหาค่าได้จากการคำนวณจำนวนกระแทกการไหลมีค่าของอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ตอนเริ่มต้น

### 3.5.2 การไหลเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อน

การไหลเข้าเป็นช่วงเชิงความร้อนตามแนวทิศทางการไหลนั้น สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับกรณี ที่ระบุค่าฟลักซ์ความร้อนให้คงที่ที่ผนัง ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างขอบเขตที่เข้าเป็น ช่วงจะมีค่าคงที่ และมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มของความร้อนสุทธิจากขอบเขตของผนัง

เมื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นซ้ำกันเป็นช่วง สนามอุณหภูมิจะมีความคล้ายคลึงกับสนาม ของความดันในกรณีของการไหลเป็นช่วงเชิงความเร็ว โดยมีสมการดังนี้

$$\frac{T(\bar{r} + \bar{L}) - T(\bar{r})}{L} = \frac{T(\bar{r} + 2\bar{L}) - T(\bar{r} + \bar{L})}{L} = \sigma \quad (3.18)$$

เมื่อค่า  $\sigma$  คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนได้ในเทอมของการเพิ่มความร้อน ทั้งหมดภายในโดเมน,  $Q$  ดังสมการ

$$\sigma = \frac{Q}{\dot{m} c_p L} = \frac{T_{\text{bulkexit}} - T_{\text{bulkinlet}}}{L} \quad (3.19)$$

เมื่อค่า  $\dot{m}$  คืออัตราการไหลเชิงมวลที่กำหนดให้ และค่า  $T_{\text{bulk}}$  มีนิยามโดย

$$T_{\text{bulk}} = \frac{\int_A T |\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}|}{\int_A |\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}|} \quad (3.20)$$

เมื่อ  $T_{\text{bulk}}$  อินทิเกรตตลอดพื้นที่หน้าตัดของโดเมนการไหลที่เข้าเป็นช่วง,  $A$

### 3.6 สมการพื้นฐานและแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือ สำหรับใช้ช่วยแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในการคำนวณ เพื่อประมาณผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อนและมีความ ยุ่งยากในการหาผลเฉลยด้วยวิธีแม่นยำ หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับ สมการควบคุม ซึ่งสมการควบคุมพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการโมเมนตัม (Momentum Equation) และสมการพลังงาน (Energy Equation) สมการดังกล่าวสามารถบ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพของของไหลและสิ่งต่างๆ ที่เกิดขึ้น ในขณะที่เกิดการไหล และสมการควบคุมที่ได้จะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยที่อธิบาย ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประมาณผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ สำหรับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้นิยมกันทั่วไปคือ ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume) มา ช่วยในการหาคำตอบและอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.1 สมการควบคุม

สำหรับการไหลภายในท่อกลมจะประกอบไปด้วยสมการควบคุมต่างๆ ได้แก่ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน สามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนที่สถานะคงตัว (steady state) ได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.21)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) \quad (3.22)$$

สมการพลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\Gamma + \Gamma_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3.23)$$

เมื่อ  $\Gamma = \mu / Pr$  และ  $\Gamma_t = \frac{\mu_t}{Pr_t}$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อนทางโมเลกุลและ

สัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อนปั่นป่วน ตามลำดับ

สมการ (3.21) และ (3.22) เรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ส (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation, RANS) จะสังเกตได้ว่าสมการที่ได้นี้มีรูปแบบคล้ายคลึงกับสมการนาเวียร์-สโตคส์แบบปกติ เพียงแต่มีเทอมของค่าความเค้นของเรย์โนลด์ส (Reynolds Stress)  $\frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i u_j})$  เพิ่มเข้ามาในสมการ ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วนนั่นเอง

เมื่อทำการเฉลี่ยปริมาณใดๆ ในสมการควบคุมตลอดช่วงเวลาช่วงหนึ่งของการไหลและของไหล จะทำให้เกิดตัวแปรขึ้นมาใหม่และส่งผลให้มีจำนวนตัวแปรไม่รู้ค่ามีจำนวนมากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ ซึ่งก็คือเทอมความเค้นของเรย์โนลด์สที่เพิ่มมานั่นเอง ทำให้ไม่สามารถหาผลลัพธ์ที่ต้องการได้ จึงจำเป็นต้องอาศัยสมการของแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) เข้ามาช่วยหาคำตอบ เพื่อให้การแก้ปัญหาที่มีความถูกต้องในระดับที่พอเพียงและครอบคลุมปัญหาความปั่นป่วนได้ ซึ่งจะได้กล่าวถึงแบบจำลองนี้ในหัวข้อต่อไป

### 3.6.2 แบบจำลองความปั่นป่วน

การหาผลเฉลยสมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ส (RANS) นั้น จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนมาช่วยในการคำนวณเพื่อหาค่าความเค้น ซึ่งเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เค้นของเรย์โนลด์ส์ที่การคำนวณแบบปกติไม่สามารถหาได้ ซึ่งการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนนี้จะช่วยให้ไม่ต้องหาค่าของการกระเพื่อมแต่จะสนใจเฉพาะส่วนของค่าเฉลี่ยเท่านั้น สำหรับการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้นจึงจะสามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำ และใช้ระยะเวลาที่น้อยที่สุด ตัวอย่างแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้กันทั่วไปมีอยู่หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน แบบจำลองความปั่นป่วน RNG  $k-\varepsilon$  แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\omega$  แบบจำลองความปั่นป่วน The Shear-Stress Transport (SST)  $k-\omega$  แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds Stress Model (RSM) เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองความปั่นป่วนที่นำมาใช้คือ Realizable  $k-\varepsilon$  เท่านั้น

### 3.6.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\varepsilon$

แบบจำลอง Realizable  $k-\varepsilon$  เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน โดยมีความแตกต่างจากแบบมาตรฐานคือ แบบจำลอง Realizable  $k-\varepsilon$  ได้รวมเอาแบบความหนืดปั่นป่วนและสมการการเคลื่อนย้ายของอัตราการกระจาย  $\varepsilon$  แบบใหม่ ซึ่งได้มาจากสมการผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับการเคลื่อนย้ายของการผันแปรความเร็วเฉลี่ย โดยเหมาะกับการนำมาใช้ในการไหลแบบหมุนวน (swirling flow) ดังเช่นในงานวิจัยนี้ ดังนั้นการนำแบบจำลอง Realizable  $k-\varepsilon$  มาใช้วิเคราะห์การไหลในงานวิจัยนี้จึงมีความน่าเชื่อถือกว่าแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน

สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง Realizable  $k-\varepsilon$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (3.25)$$

$$\text{เมื่อ } G_k = \mu_t S^2, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = Sk / \varepsilon$$

โดย  $G_k$  คือการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากการเฉือนความเร็วเฉลี่ย,  $C_1$  และ  $C_2$  คือค่าคงที่,  $\sigma_k$  และ  $\sigma_\varepsilon$  คือเลขพรานด์ปั่นป่วนสำหรับ  $k$  และ  $\varepsilon$  ตามลำดับ,  $S_k$  และ  $S_\varepsilon$  คือชอคเทอม

ตัวแปร  $k$  ในสมการ (3.24) คือสมการเดียวกันกับแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน ยกเว้นค่าคงที่ แต่ตัวแปร  $\varepsilon$  ในสมการ (3.25) จะแตกต่างจากแบบจำลองมาตรฐานออกไป เนื่องจากเทอมของการสร้าง  $\varepsilon$  ของ Realizable นี้ไม่เกี่ยวข้องกับการสร้างค่า  $k$  โดยจะเห็นว่าไม่มีเทอม  $G_k$  อยู่ในสมการดังเช่นแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  อื่นๆ

สำหรับค่าความหนืดปั่นป่วน  $\mu_t$  สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_t = \rho C_\mu (k^2 / \varepsilon) \quad (3.26)$$

เมื่อ  $C_\mu$  คือค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$C_\mu = (A_0 + A_s k U^* / \varepsilon)^{-1} \quad (3.27)$$

เมื่อ

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad (3.28)$$

โดย  $A_0 = 4.04$  และค่าคงที่  $A_s$  สามารถหาได้จาก

$$A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (3.29)$$

เมื่อ  $\phi = (1/3) \cos^{-1} \sqrt{6W}$ ,  $W = S_{ij} S_{jk} S_{ki} / \bar{S}^3$ ,  $\bar{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$   
และ  $k_t = \mu_t C_p / 0.85$

ซึ่งค่าคงที่  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\sigma_k$  และ  $\sigma_\varepsilon$  สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable  $k-\varepsilon$  ถูกกำหนดให้มีค่าดังนี้

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0 \text{ และ } \sigma_\varepsilon = 1.2$$

### 3.6.2.2 การคู่ควบของความดันและความเร็ว

ในการคำนวณเชิงตัวเลขของพลศาสตร์ของไหลจำเป็นต้องมีกระบวนการวิธีต่างๆ เข้ามาช่วยหาค่าของสนามความดัน โดยงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) เข้ามาช่วยในการหาคำตอบ ซึ่งในกระบวนการวิธีนี้จะเริ่มต้นจากการสุ่มค่าของสนามความดันและทำการหาคำตอบของสมการโมเมนตัมและสมการค่าแก้ของสนามความดัน เมื่อได้ค่าดังกล่าวแล้วจึงนำมาปรับปรุงค่าของสนามความดันและสนามความเร็วที่ได้ นำค่าสนามความเร็วและสนามความดันที่ได้ใหม่นั้นป้อนสู่สมการโมเมนตัมและสมการค่าแก้ของสนามความดันอีกครั้ง และทำซ้ำต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนกระทั่งคำตอบทั้งหมดลู่เข้าก็จะได้ค่าสนามความดันและสนามความเร็วที่เป็นไปตามกฎการเคลื่อนย้ายมวลและกฎการอนุรักษ์มวล

กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE นั้น จะเริ่มจากการสุ่มค่าสนามความดัน  $p^*$  ตลอดช่วงโดเมนการไหล จากนั้นจึงทำการหาฟลักซ์ที่ผิว  $J_f^*$  ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$J_f^* = j_f^* + d_f (P_{c0}^* - P_{c1}^*) \quad (3.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากไม่สอดคล้องกับสมการต่อเนื่อง จะดำเนินการแก้ไขโดยการนิยามเทอม  $J_f'$  ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าฟลักซ์ที่ผิวที่ถูกต้องกับค่าฟลักซ์ที่สุ่มขึ้น แสดงได้ดังนี้

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad (3.31)$$

เพื่อให้สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องนั้น กระบวนวิธีแบบ SIMPLE จะตั้งสมมติฐานเทอมของ  $J_f'$  ดังนี้

$$J_f' = d_f(p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.32)$$

เมื่อ  $p'$  คือค่าแก้ของความดัน

กระบวนวิธีแบบ SIMPLE จะแทนค่าจากสมการ (3.31) และ (3.32) ลงในสมการความต่อเนื่อง ซึ่งนำไปสู่สมการแปลงรูปของ  $p'$  ในเซลล์ย่อย แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \quad (3.33)$$

เมื่อเทอมของแหล่งกำเนิด  $b$  คืออัตราการไหลสุทธิเข้าสู่เซลล์ย่อย ดังสมการ

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f \quad (3.34)$$

สมการค่าแก้ของความดัน  $p'$  สามารถเขียนได้โดยใช้ระเบียบวิธีการทำซ้ำ และเมื่อได้ค่าของผลเฉลยแล้ว ค่าความดันและฟลักซ์ที่ผิวของเซลล์ที่ถูกต้องคือ

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (3.35)$$

$$J_f = J_f^* + d_f(p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.36)$$

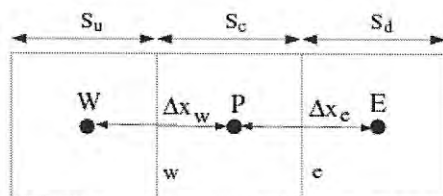
โดยค่า  $\alpha_p$  คือตัวประกอบภายใต้ความผ่อนคลาย (under-relaxation) สำหรับความดัน

### 3.6.2.3 วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK

วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) ใช้ในการคำนวณค่าที่ผิวเซลล์  $\phi_f$  ซึ่งมีอันดับของความแม่นยำที่สูงขึ้น โดยใช้พื้นฐานของการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของวิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับสอง (Second order upwind) ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรที่ศูนย์กลาง สำหรับผิวเซลล์  $e$  ดังรูปที่ 3.5 หากมีการไหลจากทิศทางซ้ายไปขวา ค่าที่ผิวเซลล์  $e$  สามารถเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_e = \theta \left[ \frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_p + \frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1-\theta) \left[ \frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_p - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_w \right] \quad (3.37)$$



รูปที่ 3.5 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ

เมื่อค่า  $\theta=1$  สมการที่ (3.37) จะกลายเป็นสมการประมาณค่าในช่วงที่ศูนย์กลางอันดับสอง (central second order interpolation) ในขณะที่  $\theta=0$  จะได้สมการของการประมาณอันดับสอง แต่โดยทั่วไปแล้วการประมาณค่าแบบ QUICK จะกำหนดให้  $\theta=1/8$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การออกแบบอุปกรณ์และขั้นตอนการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้าง อุปกรณ์ และขั้นตอนการศึกษา โดยจะอธิบายถึงการปรับปรุงรูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งรูปแบบแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมได้ถูกปรับปรุงรูปทรงในหลากหลายลักษณะเพื่อวิเคราะห์หารูปทรงที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงค่าการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเป็นหลัก การปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมได้กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์หลักๆ ดังนี้ คือ อัตราส่วนความกว้างทางเข้า ( $D_{R,i}$ ), อัตราส่วนความกว้างทางออก ( $D_{R,o}$ ), อัตราส่วนพิตช์ ( $P_R$ ) และองศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ )

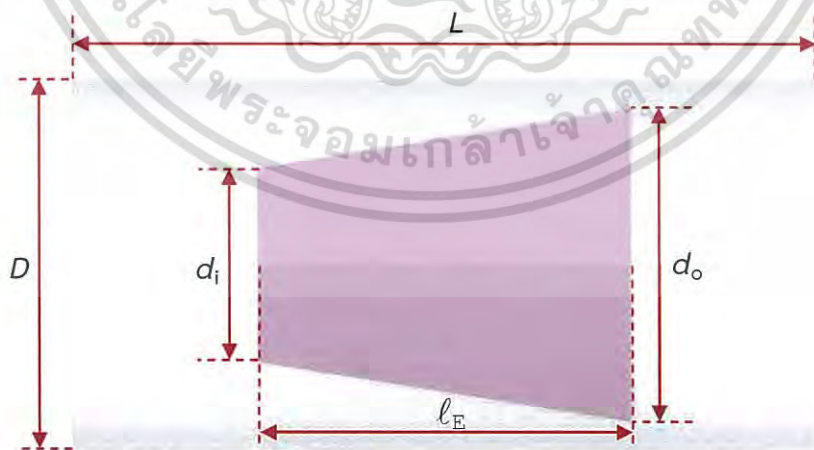
### 4.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่ใช้ในการศึกษา

#### 4.1.1 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้เริ่มต้นจากการศึกษาแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม คือ แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรง โดยได้กำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนความกว้างทางเข้า ( $d_i/D, D_{R,i}$ ) = 0.6
2. อัตราส่วนความกว้างทางออก ( $d_o/D, D_{R,o}$ ) = 0.81 (สี่เหลี่ยม), 0.97 (หกและแปดเหลี่ยม)
3. อัตราส่วนพิตช์ ( $P_R$ ) = 2.0
4. อัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวย ( $l_E/D$ ) = 1D หรือเท่ากับ 50 mm.
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ ) = 0.05 m. หรือเท่ากับ 50 mm.

เมื่อนำแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมใส่ภายในท่อกลมผิวเรียบจะสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

หลังจากศึกษาแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่ใส่ภายในท่อกลมแบบดั้งเดิมพบว่าการใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมไว้ภายในท่อกลมสามารถเหนี่ยวนำให้ของไหลเกิดการไหลแบบหมุนวน และส่งผลให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนได้ จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของไหลกับผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นหนังสือฉบับนี้หรือเอกสารนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

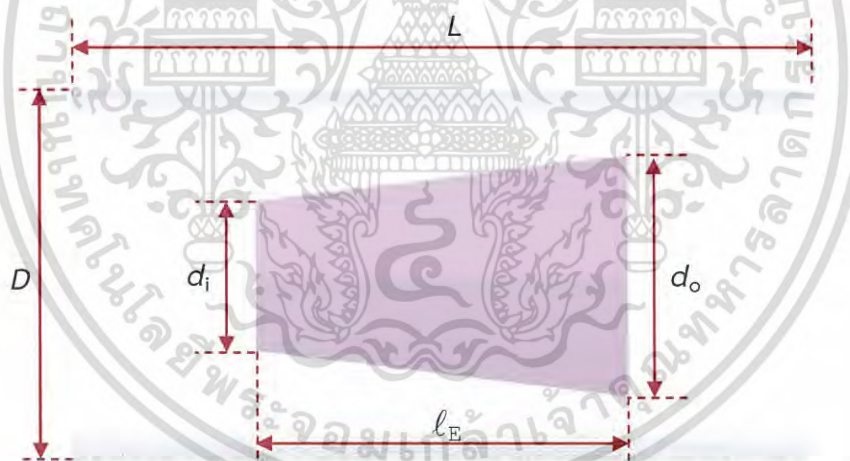
ท่อกลมมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ แต่อย่างไรก็ตามการใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมไว้ภายในท่อจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นมาก เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพที่ได้ยังถือว่าได้ผลไม่ด้นัก จึงเป็นสาเหตุที่ต้องทำการปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมต่อไป โดยการบีบให้หน้าตัดของแหวนกรวยลดลงเพื่อลดอัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (aspect ratio,  $a_r$ ) ซึ่งคาดหวังว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการปรับปรุงจะมีค่าลดลง รายละเอียดดังหัวข้อมัดไป

#### 4.1.2 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด aspect ratio, $a_r$ )

การปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบที่ 1 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมลงจากแบบดั้งเดิม โดยการลดค่า  $a_r$  ของแหวนทรงกรวยให้น้อยลง ซึ่งกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนความกว้างทางเข้า ( $d_i/D, D_{R,i}$ ) = 0.6
2. อัตราส่วนความกว้างทางออก ( $d_o/D, D_{R,o}$ ) = 0.81(สี่เหลี่ยม), 0.97(หกและแปดเหลี่ยม)
3. อัตราส่วนพิตช์ ( $P_R$ ) = 2.0
4. อัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวย ( $l_E/D$ ) =  $1D$  หรือเท่ากับ 50 mm.
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ ) = 0.05 m. หรือเท่ากับ 50 mm.
6. อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างหน้าตัด ( $a_r$ ) = 0.67

การปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 1 (ลด  $a_r$ ) ที่ใส่ภายในท่อกลมผิวเรียบจะสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด  $a_r$ )

เมื่อได้ทำการศึกษาแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่มีการปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด  $a_r$ ) พบว่าการใส่แหวนทรงกรวยสามารถเพิ่มการไหลหมุนวนแบบปั่นป่วนภายในท่อได้ จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังท่อกลมมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อเปรียบเทียบกับกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมพบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้มีค่าลดลงมาก แต่อย่างไรก็ตามการใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 นี้ ยังคงส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าที่สูงอยู่และไม่เหมาะกับการนำไปใช้งาน จึงมีความจำเป็นต้องทำการปรับปรุงแหวนทรงกรวยนี้เพิ่มเติมโดยทำการทำมุมปะทะในแนวระนาบด้านหน้า (ทรงกลม) เพื่อช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานให้น้อยลงยิ่งขึ้น

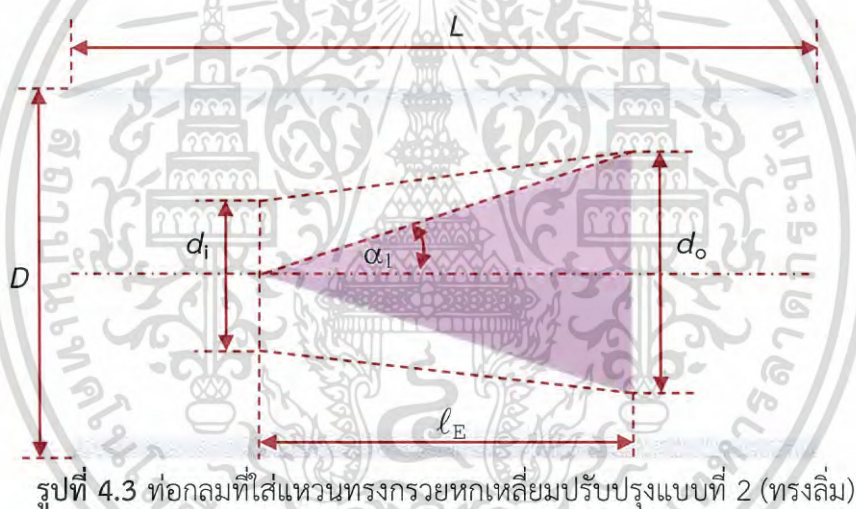
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงกลม)

การปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบที่ 2 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมลงจากแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุง 1 โดยการปรับปรุงแหวนทรงกรวยให้เป็นทรงกลมทวนกระแสน้ำเพื่อให้การปะทะกับของไหลน้อยลง โดยกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนความกว้างทางเข้า ( $d_i/D, D_{R,i}$ ) = 0.6
2. อัตราส่วนความกว้างทางออก ( $d_o/D, D_{R,o}$ ) = 0.81(สี่เหลี่ยม), 0.97(หกและแปดเหลี่ยม)
3. อัตราส่วนพิทช์ ( $P_R$ ) = 2.0
4. อัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวย ( $l_E/D$ ) =  $1D$  หรือเท่ากับ 50 mm.
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ ) = 0.05 m. หรือเท่ากับ 50 mm.
6. อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างหน้าตัด ( $\alpha_r$ ) = 0.67
7. มุมปะทะในแนวระนาบ ( $\alpha_1$ ) =  $15.2^\circ$  (สี่เหลี่ยม) และ  $18^\circ$  (หกและแปดเหลี่ยม)

การปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 2 (ทรงกลม) สามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.3 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละตัวแปร และภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบ 3 มิติของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 2 (ทรงกลม)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

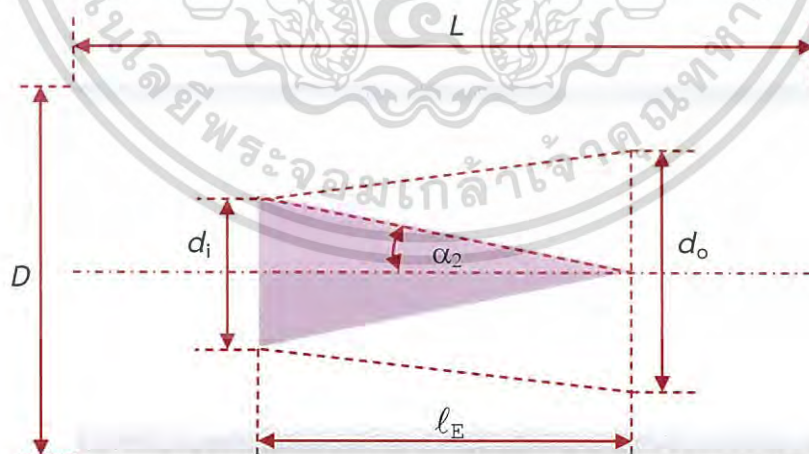
เมื่อได้ทำการศึกษาแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ้ม) พบว่าการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อสามารถทำให้การไหลหมุนวนแบบปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นและเกิดการกระจายอุณหภูมิของของไหลไปสู่บริเวณผิวท่อมากขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังท่อกลมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และการใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 นี้ยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด  $\alpha_1$ ) ตามที่คาดหวังไว้ เนื่องจากพื้นที่ขวางการไหลจากแหวนกรวยลดน้อยลง ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงรูปแบบให้มุมปะทะกับของไหลให้น้อยลงที่สุดเพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทานให้น้อยลงกว่าเดิม ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 4.1.4 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ้มกลับทิศ)

การปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบที่ 3 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมลงจากแบบปรับปรุง 2 โดยการปรับปรุงแหวนทรงกรวยให้เป็นทรงลิ้มกลับทิศเพื่อลดมุมปะทะกับของไหลให้น้อยลงกว่าเดิม โดยตัวแปรต่างๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

1. อัตราส่วนความกว้างทางเข้า ( $d_i/D, D_{R,i}$ ) = 0.6
2. อัตราส่วนความกว้างทางออก ( $d_o/D, D_{R,o}$ ) = 0.81(สี่เหลี่ยม), 0.97(หกและแปดเหลี่ยม)
3. อัตราส่วนพิตช์ ( $P_R$ ) = 2.0
4. อัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวย ( $l_E/D$ ) =  $1D$  หรือเท่ากับ 50 mm.
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ ) = 0.05 m. หรือเท่ากับ 50 mm.
6. อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างหน้าตัด ( $\alpha_1$ ) = 0.67
7. มุมปะทะในแนวระนาบ ( $\alpha_2$ ) =  $11.5^\circ$

การปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 3 (ทรงลิ้มกลับทิศ) สามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.5 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละตัวแปร และภาพที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบ 3 มิติของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 3



รูปที่ 4.5 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ้มกลับทิศ)



รูปที่ 4.6 ภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงสี่มกลีบทิศ)

จากการศึกษาแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 หรือทรงสี่มกลีบทิศ พบว่าการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อสามารถทำให้การไหลหมุนวนแบบปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นและเกิดการกระจายอุณหภูมิของของไหลไปสู่บริเวณผิวท่อมากขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของไหลกับผนังท่อกลมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และการใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 นี้ยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงสี่ม) ตามที่ได้คาดหวังไว้ เนื่องจากพื้นที่ขวางการไหลจากแหวนกรวยลดน้อยลงกว่าแบบปรับปรุง 2 ดังนั้นการปรับปรุงโดยการเพิ่มมุมปะทะทั้งด้านหน้าและกลับทิศจะถูกนำไปศึกษาต่อหัวข้อถัดไป โดยมีแนวคิดว่าหากทำการตัดมุมทั้งสองด้านค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้จะลดลงกว่าเดิม การประยุกต์ครั้งนี้จึงเป็นรูปแบบแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 4-1, 4-2 และ 4-3 ที่ระยะการตัดมาบรรจบที่  $0.25D$ ,  $0.5D$  และ  $0.75D$  ตามลำดับ เมื่อ  $D$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อกลม

#### 4.1.5 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชร)

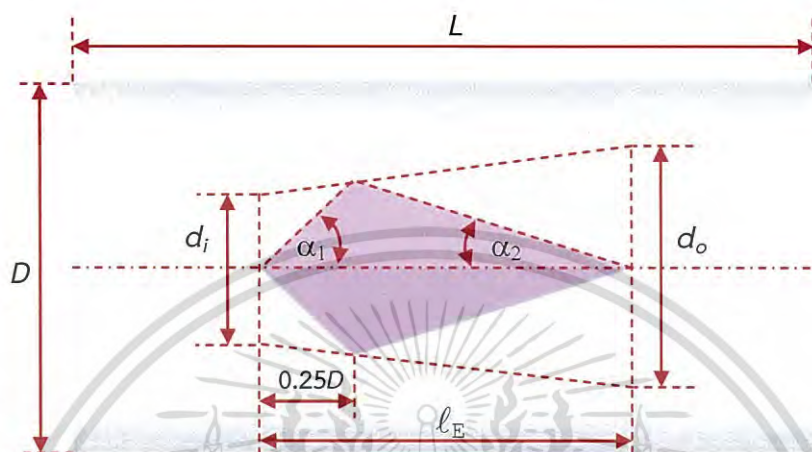
การปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบที่ 4 นี้ มีจุดประสงค์เพื่อทดลองปรับปรุงมุมปะทะของแหวนทรงกรวยทั้งด้านหน้าและหลัง โดยการปรับปรุงแหวนทรงกรวยให้เป็นทรงเพชรเพื่อคาดหวังว่าสามารถลดมุมปะทะกับของไหลให้น้อยลงกว่าเดิม โดยมีระยะมุมปะทะที่มาบรรจบกันที่  $0.25D$ ,  $0.5D$  และ  $0.75D$  ตามรูปแบบที่ 4-1, 4-2 และ 4-3 ตามลำดับ และค่าตัวแปรต่างๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

##### แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4-1 (ระยะตัด $0.25D$ )

1. อัตราส่วนความกว้างทางเข้า ( $d_i/D$ ,  $D_{R,i}$ ) = 0.6
2. อัตราส่วนความกว้างทางออก ( $d_o/D$ ,  $D_{R,o}$ ) = 0.81(สี่เหลี่ยม), 0.97(หกและแปดเหลี่ยม)
3. อัตราส่วนพิตช์ ( $P_R$ ) = 2.0
4. อัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวย ( $l_E / D$ ) =  $1D$  หรือเท่ากับ 50 mm.
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ ) = 0.05 m. หรือเท่ากับ 50 mm.
6. มุมปะทะด้านหน้า-ด้านหลัง ( $\alpha_1 - \alpha_2$ ) =  $(41.5^\circ - 16.5^\circ)$  ทรงสี่เหลี่ยม,  $(43^\circ - 17.5^\circ)$  ทรงหกและแปดเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุที่มุมปะทะของแหวนทรงกรวยมีค่าไม่เท่ากันนั้นเกิดจากลักษณะที่แตกต่างกันทางกายภาพของรูปทรงแหวนทรงกรวย เมื่อต้องการสร้างมุมไปที่ระยะที่ใกล้เคียงกับ  $0.25D$  เมื่อวัดจากด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวยนั้นจะทำให้ต้องสร้างมุมที่ไม่เท่ากัน และมุมปะทะที่แบบปรับปรุง 4-1 ที่ใส่ภายในท่อกลมผิวเรียบจะสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.7 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละค่าตัวแปรและภาพที่ 4.8 ได้แสดงให้เห็นถึงภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 4-1



รูปที่ 4.7 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4-1

รูปที่ 4.8 ภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4-1

จากการศึกษาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 4-1 ที่ระยะตัด  $0.25D$  พบว่าการปรับปรุงรูปทรงนี้สามารถช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนได้สูงขึ้น แต่ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่าการปรับปรุงทรงเพชรที่มีลักษณะมุมปะทะเช่นนี้จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดหรือไม่ จึงต้องทำการทดลองปรับปรุงรูปทรงเพชรโดยใช้มุมตัดที่ระยะต่างๆ ในการศึกษาต่อไปจะปรับปรุงมุมปะทะไปที่ระยะที่ใกล้เคียงกับ  $0.5D$  โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

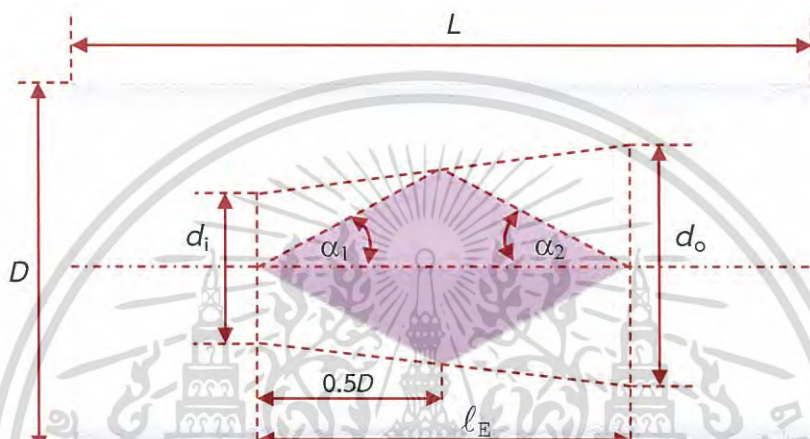
**แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4-2 (ระยะตัด  $0.5D$ )**

1. ความกว้างของทางเข้า ( $d_i/D, D_{R,i}$ ) = 0.6
2. ความกว้างของทางออก ( $d_o/D, D_{R,o}$ ) = 0.81(สี่เหลี่ยม), 0.97(หกและแปดเหลี่ยม)
3. อัตราส่วนระยะพิตช์ ( $P_R$ ) = 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวย ( $l_E / D$ ) =  $1D$  หรือเท่ากับ 50 mm.
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ ) = 0.05 m. หรือ 50 mm.
6. มุมปะทะด้านหน้า-ด้านหลัง ( $\alpha_1 - \alpha_2$ ) =  $(26.5^\circ - 26.5^\circ)$  ทรงสี่เหลี่ยม,  $(28^\circ - 28^\circ)$  ทรงหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยม

แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 4-2 โดยปรับมุมปะทะไปบรรจบที่ระยะใกล้เคียงกับ  $0.5D$  เมื่อวัดจากด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวย สามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.9 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละค่าตัวแปร และภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 4-2



รูปที่ 4.9 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4-2

รูปที่ 4.10 ภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4-2

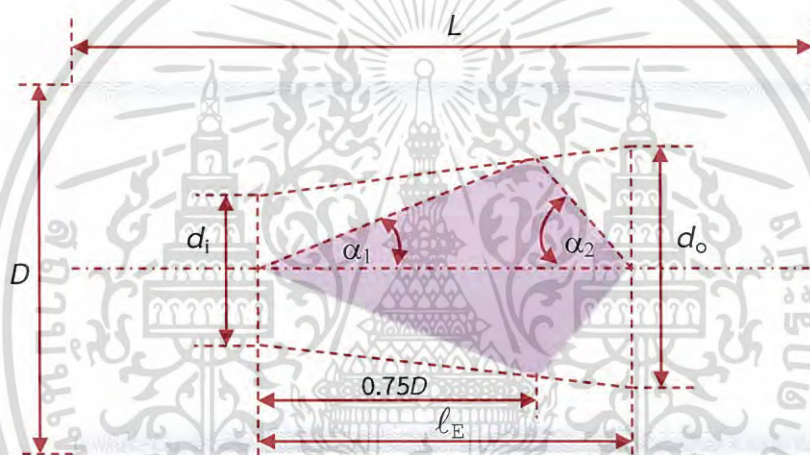
จากการศึกษาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 4-2 ที่ระยะตัด  $0.5D$  พบว่าการปรับปรุงรูปทรงนี้สามารถช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนได้สูงขึ้น แต่ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่า การปรับปรุงทรงเพชรลักษณะมุมปะทะเช่นนี้จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดหรือไม่ จึงต้องทำการทดลองปรับปรุงแหวนทรงกรวยทรงเพชรโดยใช้มุมปะทะที่ระยะต่างๆ ในการศึกษาต่อไปจะปรับมุมปะทะไปที่ระยะที่ใกล้เคียงกับ  $0.75D$  โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4-3 (ระยะตัด $0.75D$ )

1. อัตราส่วนความกว้างทางเข้า ( $d_i/D, D_{R,i}$ ) = 0.6
2. อัตราส่วนความกว้างทางออก ( $d_o/D, D_{R,o}$ ) = 0.81(สี่เหลี่ยม), 0.97(หกและแปดเหลี่ยม)
3. อัตราส่วนพิทช์ ( $P_R$ ) = 2.0
4. อัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวย ( $l_E/D$ ) =  $1D$  หรือเท่ากับ 50 mm.
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ ) = 0.05 m. หรือเท่ากับ 50 mm.
6. มุมปะทะด้านหน้า-ด้านหลัง ( $\alpha_1 - \alpha_2$ ) = ( $18.5^\circ - 47.5^\circ$ ) ทรงสี่เหลี่ยม, ( $21.5^\circ - 50^\circ$ ) ทรงหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยม

แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 4-3 โดยปรับมุมปะทะไปบรรจบที่ระยะใกล้เคียงกับ  $0.75D$  เมื่อวัดจากด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวย สามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.11 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละค่าตัวแปร และภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 4-3



รูปที่ 4.11 ทอกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4-3



รูปที่ 4.12 ภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4-3

จากการศึกษาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 4-3 ที่ระยะตัด  $0.75D$  พบว่าการปรับปรุงรูปทรงนี้สามารถช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนได้สูงขึ้น แต่ผลที่ได้ยังไม่ใช่ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่ผ่านมา และจากการปรับปรุงแหวนทรงกรวยโดยสร้างมุม ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปะทะเป็นทรงเพชร ทำให้ทราบว่าช่วยให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยที่แหวนทรงกรวยแต่ละรูปแบบให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ต่างกัน ณ ที่มุมปะทะแบบต่างๆ

ดังนั้นจากการศึกษาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงทั้งแบบที่ 1, 2, 3, 4 และแบบดั้งเดิมจึงเป็นเหตุผลให้สรุปได้ว่าแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 หรือทรงลิ่มกลับทิศ มีความเหมาะสมในการศึกษาและนำเสนอใจมากที่สุด เนื่องจากแหวนทรงกรวยทรงหกเหลี่ยมแบบทรงลิ่มกลับทิศให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับในทุกกรณีที่น่ามาปรับปรุง อย่างไรก็ตาม การพิจารณาการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทานและลักษณะการไหลของของไหลทดสอบ เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงทั้งแบบที่ 1, 2, 3, 4 และแบบดั้งเดิม จะได้กล่าวถึงในบทต่อไปเพื่อเปรียบเทียบค่าในแต่ละหัวข้อและเพื่อการพิจารณาอย่างเหมาะสม

## 4.2 ตัวแปรที่สนใจในการวิเคราะห์ปัญหา

ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการหลักๆ ทั้งหมด 4 สมการที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบไปด้วยเลขนัสเซลล์เฉลี่ย ( $Nu$ ), ตัวประกอบความเสียดทานแฟนนิง ( $f$ ), ตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน ( $TEF$ ) และเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ที่อยู่ในสถานะคงตัว (steady state) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละสมการมีดังนี้

เลขนัสเซลล์เฉลี่ย

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_s dA \quad (4.1)$$

ตัวประกอบความเสียดทานแฟนนิง

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

เมื่อ  $\Delta p$  คือค่าความดันตกคร่อม และ  $L$  คือความยาวหนึ่งช่วงการไหล

ตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน

$$TEF = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \bigg|_{pp} = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (4.3)$$

เลขเรย์โนลด์ส

$$Re = \rho u_0 D / \mu \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์หารูปแบบแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่เหมาะสมจะเปรียบเทียบผลจากค่าที่ได้จากตัวแปรหลักๆ ข้างต้น เพื่อเป็นตัวชี้วัดรูปแบบที่เหมาะสม โดยหลักการวิเคราะห์เบื้องต้นคือ ค่าเลขนัสเซลล์หรือค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต้องมีค่าสูง ค่าตัวประกอบเสียดทานต้องมีค่าต่ำ และค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อนหรือค่าสมรรถนะเชิงความร้อนต้องมีค่าสูง ซึ่งค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะเป็นตัวชี้วัดท้ายสุดที่จะบ่งชี้ได้ว่าแหวนทรงกรวยนี้เหมาะสมในการนำไปใช้หรือไม่

### 4.3 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

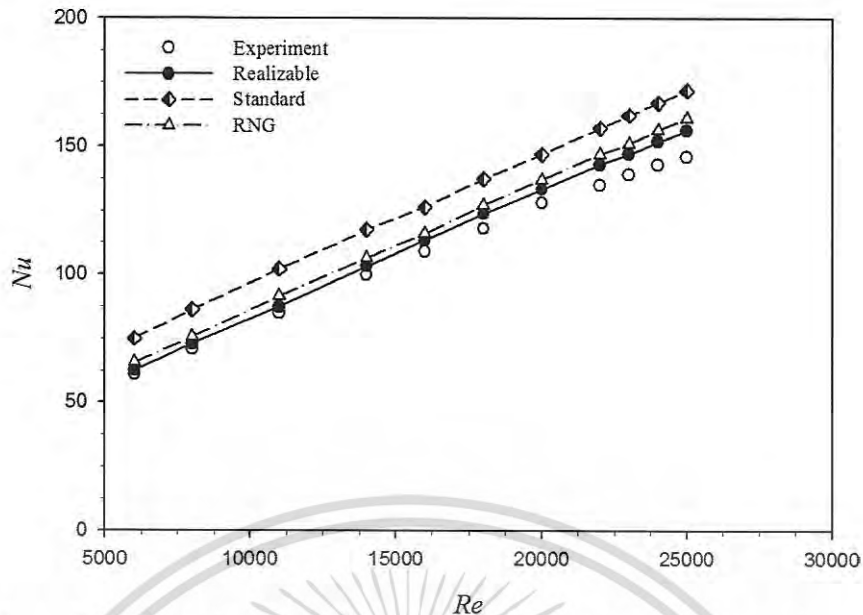
สำหรับการคำนวณการไหลในสามมิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

1. สภาวะที่ทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translation
2. ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ
3. กำหนดอุณหภูมิของอากาศเข้าที่ 300K
4. คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า
5. กำหนดให้ค่าเลขพรานด์ (Prandtl number, Pr) มีค่าคงที่เท่ากับ 0.707 และไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่
6. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังมีความเร็วเท่ากับศูนย์ (no slip condition) และเป็นผนังที่อยู่กับที่ (stationary wall)
7. กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนของแหวนทรงกรวยมีค่าเท่ากับศูนย์หรือเป็นฉนวน
8. กำหนดให้ผนังของท่อกลมมีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่  $600 \text{ W/m}^2$

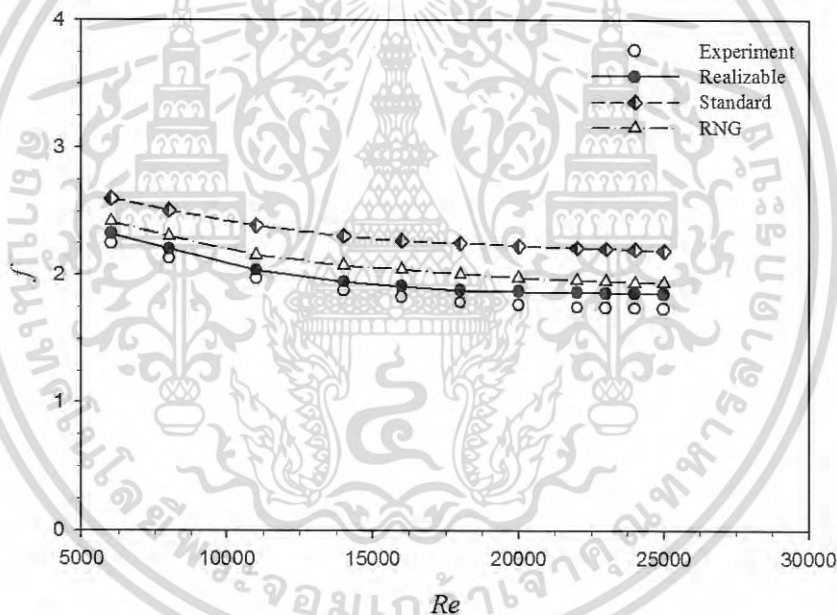
### 4.4 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข

#### 4.4.1 การตรวจสอบแบบจำลองปั่นป่วน

ก่อนที่จะนำแบบจำลองเชิงตัวเลขไปใช้ในการหาคำตอบในการทดลองนั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองปั่นป่วนที่ใช้เสียก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลองปั่นป่วนที่ใช้มีความถูกต้องแม่นยำ โดยเลือกเปรียบเทียบผลของแบบจำลองปั่นป่วนกับงานวิจัยในอดีตของ Promvongse [13] และใช้รูปแบบแหวนทรงกรวยที่ติดตั้งในท่อกลมในรูปแบบการจัดวางแบบ CR และอัตราส่วนความกว้างทางออก  $d/D$  เท่ากับ 0.5 เปรียบเทียบกับแบบจำลองปั่นป่วน  $k-\epsilon$  ในรูปแบบต่างๆ (ใช้กระบวนการวิธีแบบ QUICK) โดยผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14



รูปที่ 4.13 เลขนัสเซิลท์จากแบบจำลองปั่นป่วน  $k-\epsilon$  และผลการทดลองของ Promvonge [13]



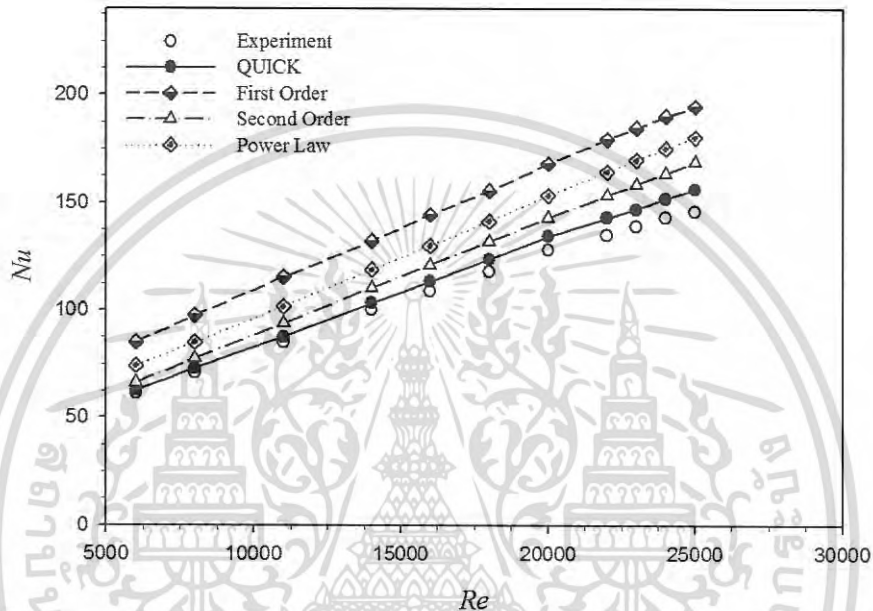
รูปที่ 4.14 ตัวประกอบเสียดทานจากแบบจำลองปั่นป่วน  $k-\epsilon$  และผลการทดลองของ Promvonge [13]

ซึ่งการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและผลจากการทดลองของ Promvonge พบว่ามีความใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยแบบจำลองปั่นป่วน Realizable  $k-\epsilon$  ให้ผลของเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานใกล้เคียงกับผลทดลองของ Promvonge มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองปั่นป่วนอื่นๆ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานเทียบกับผลทดลองอยู่ที่ 6.79% และ 6.80% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ดังนั้นแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้จึงเหมาะสมกับการนำไปทดลองต่อไป

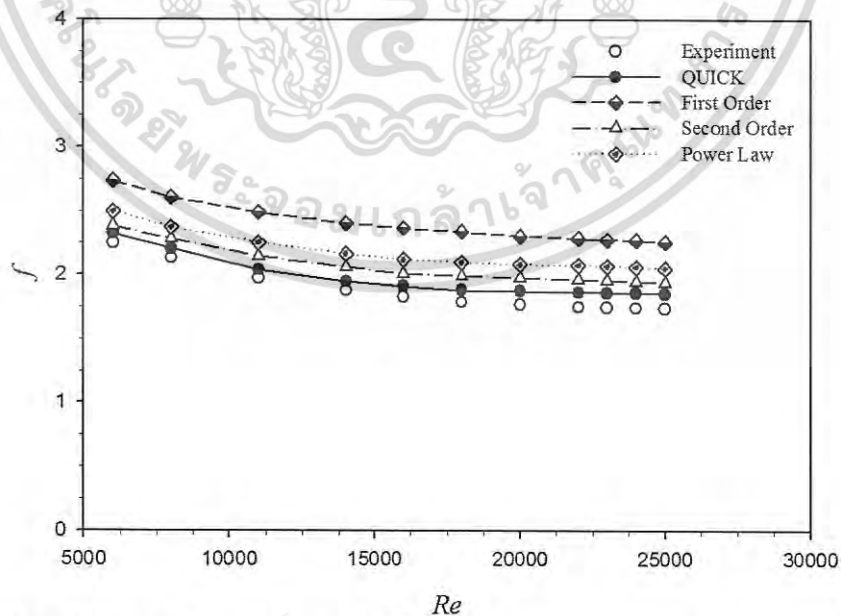
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 การตรวจสอบกระบวนการวิธี (scheme)

จากการเปรียบเทียบในหัวข้อก่อนหน้านี้ทำให้เราทราบว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ แต่กระบวนการวิธีที่ใช้ทดลองในหัวข้อก่อนหน้านี้มีเพียงแบบ QUICK เท่านั้น จึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบว่ายังมีกระบวนการวิธีอื่นๆ ที่สามารถให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำและมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Promvonge [13] มากกว่านี้หรือไม่ ซึ่งผลการเปรียบเทียบของการทดลองและแบบจำลองปั่นป่วน Realizable  $k-\varepsilon$  ในกระบวนการวิธีต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.15 เลขนัสเซลท์จากกระบวนการวิธีต่างๆ และผลการทดลองของ Promvonge [13]



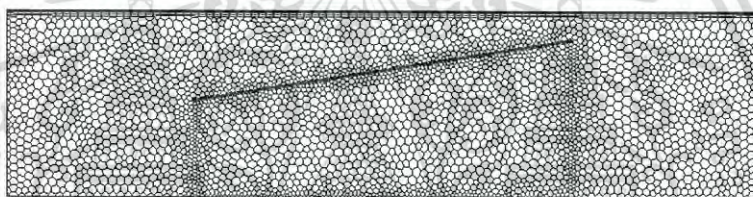
รูปที่ 4.16 ตัวประกอบเสียดทานที่กระบวนการวิธีต่างๆ และผลการทดลองของ Promvonge [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบกระบวนการวิธีต่างๆ ของแบบจำลองปั่นป่วน Realizable  $k-\epsilon$  และผลจากการทดลองของ Promvonge พบว่าผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และกระบวนการวิธีที่ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองที่สุดคือกระบวนการวิธีแบบ QUICK ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซลล์และตัวประกอบเสียดทานเทียบกับผลทดลองอยู่ที่ 6.79% และ 6.80% ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้แบบจำลองเชิงปั่นป่วน Realizable  $k-\epsilon$  ที่ใช้กระบวนการวิธีแบบ QUICK มีความเหมาะสมที่สุดในการวิจัยครั้งนี้

#### 4.5 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม

การตรวจสอบหาจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมกับการทดลองที่มีอากาศเป็นของไหลทดสอบ ซึ่งใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมให้เป็นตัวสร้างความปั่นป่วนของการไหลภายในท่อกลม โดยจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมแบบขวางการไหล กำหนดให้พิจารณาการไหลแบบเป็นคาบ (periodic) โดยคำนวณการไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง หรืออาจเรียกว่าการคำนวณแบบเป็นโมดูล มีขอบเขตการไหลเป็นแบบสมมาตร (symmetry planes) ลักษณะการสร้างรูปแบบกริดและขอบเขตการไหลในงานวิจัยนี้ได้แสดงดังภาพที่ 4.17



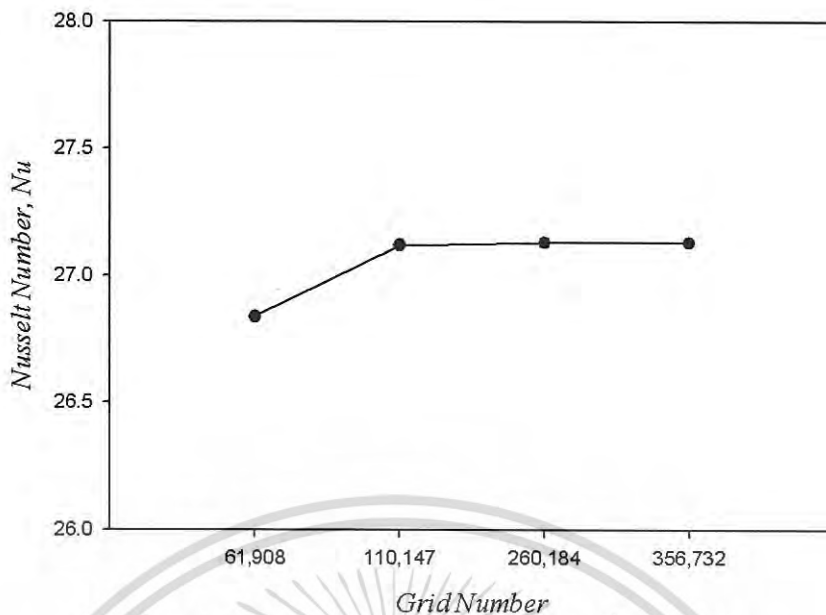
รูปที่ 4.17 รูปแบบกริดและขอบเขตการไหลของท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม

รูปแบบกริดที่ใช้สำหรับงานวิจัยที่มีการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมนี้ ได้ใช้การแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) ซึ่งพิจารณาบริเวณที่ติดผนังให้มีจำนวนกริดที่หนาแน่นโดยการอัดกริดเป็นชั้น Layer และบริเวณที่ห่างออกไปจากผนังก็มีจำนวนกริดเบาบางลงและตกริดเป็นทรง polyhedral ส่วนการหาผลกระทบของจำนวนกริดที่มีผลต่อคำตอบนั้น ได้ทำการศึกษาโดยใช้จำนวนของกริดที่แตกต่างกันจำนวน 4 ช่วง คือ ที่ 61,908, 110,147, 260,184 และ 356,732 ตามลำดับ ซึ่งการทดสอบได้ใช้วิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE และใช้ระเบียบวิธีการคำนวณแบบ QUICK สำหรับการคำนวณ Momentum, Turbulent และ Energy โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังหัวข้อที่ 4.3 เงื่อนไขการรู้เข้าหาคำตอบของทุกค่าอยู่ที่  $10^{-5}$  ยกเว้นสมการพลังงานซึ่งอยู่ที่  $10^{-9}$  ผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.1 จำนวนของกริดที่ใช้ในการทดสอบ

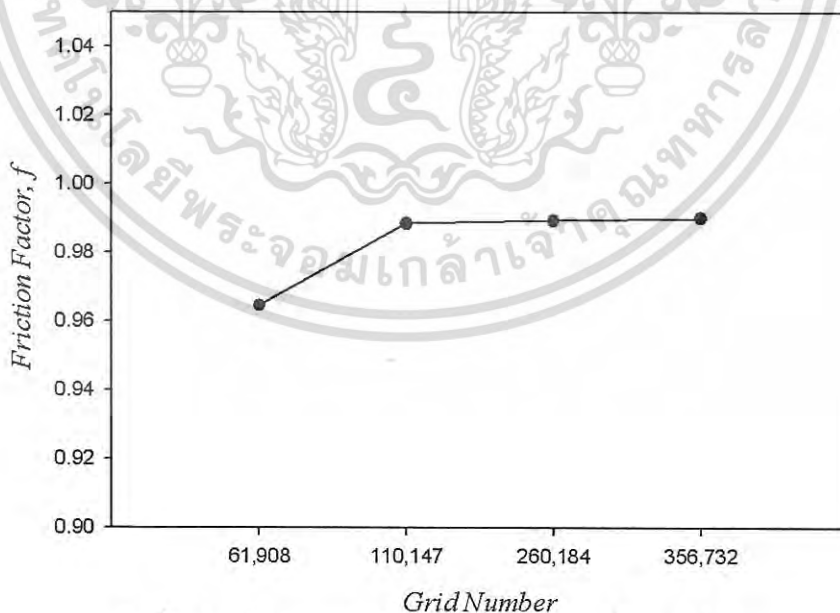
Grid number	61,908	110,147	260,184	356,732
$Nu$	26.84	27.12	27.14	27.14
$f$	0.9645	0.9884	0.9893	0.9900

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า Nu ที่  $Re=3,000$

จากรูปที่ 4.18 ซึ่งให้เห็นว่าการสร้างกริดที่จำนวน 61,908 ให้ค่า Nu ที่ต่างจากการสร้างกริดที่จำนวน 110,147 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนถึง 1.04% ดังนั้นจึงเป็นที่มาให้เพิ่มจำนวนกริดขึ้นเป็น 260,184 และเมื่อเปรียบเทียบค่า Nu ที่ จำนวนกริด 110,147 กับ 260,184 พบว่าให้ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.07% ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ และทำการเปรียบเทียบจำนวนกริดเพิ่มเติมออกไปที่จำนวน 356,732 กริด เพื่อให้แน่ใจว่าผลจากจำนวนกริดจะไม่เกิดความแปรปรวนขึ้นอีก



รูปที่ 4.19 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า f ที่  $Re=3,000$

จากรูปที่ 4.19 ซึ่งให้เห็นว่าการตีจำนวนกริดที่ 61,908 ให้ค่า f ที่ต่างจากการตีจำนวนกริดที่ 110,147 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ 2.48% ดังนั้นจึงเป็นที่มาให้เพิ่มจำนวนกริดขึ้นเป็น 260,184 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อเปรียบเทียบค่า  $f$  ที่ จำนวนกริด 110,147 กับ 260,184 พบว่าให้ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.09% เมื่อพิจารณาจากผลทดสอบจำนวนกริดจากทั้งค่า  $Nu$  และ  $f$  แล้ว จึงได้เลือกใช้จำนวนกริดอยู่ในช่วง 110,147 ในการศึกษา เนื่องจากผลที่ได้จากการทดสอบจำนวนกริดอยู่ในค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้และไม่จำเป็นต้องใช้จำนวนกริดที่มากกว่านี้เพื่อลดภาระการคำนวณให้น้อยลงจากการเลือกใช้จำนวนกริดที่เหมาะสม

#### 4.6 วิธีการดำเนินการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตที่มีการทดสอบการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข
2. สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้
3. หาจำนวนกริดที่เหมาะสมในการศึกษา
4. สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขและปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม เพื่อหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน โดยทดสอบที่เลขเรย์โนลด์ส 3,000-20,000 เพื่อหารูปแบบการปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่เหมาะสม
5. เลือกรูปแบบการปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่เหมาะสมและปรับอัตราส่วนพิทซ์ อัตราส่วนความกว้างของทางเข้าและทางออก มุมปะทะ เป็นต้น และทดสอบที่เลขเรย์โนลด์ส 3,000 ถึง 20,000 เพื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน
6. บันทึกข้อมูลค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากการทดลองในแต่ละกรณี
7. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้เพื่อเปรียบเทียบผลและเลือกรูปแบบการปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ โดยวิเคราะห์จากค่าการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของเลขนัสเซลท์ ค่าความดันตกคร่อมซึ่งอยู่ในรูปของตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมภายในท่อกลม ช่วยให้เพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมรูปแบบต่างๆ ที่ได้กล่าวมาในบทที่ 4 ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงผลจากการศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมสำหรับการใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมภายในท่อกลม ซึ่งจะพิจารณาในส่วนของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมเป็นหลัก

การแสดงผลการศึกษาจะแสดงด้วยรูปภาพหรือกราฟเพื่อให้เห็นการเปรียบเทียบที่ชัดเจน ซึ่งจะแสดงผลและอภิปรายผลเกี่ยวกับ พฤติกรรมการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมภายในท่อกลมแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมในรูปแบบต่างๆ การกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนกรวยหลายเหลี่ยมภายในท่อกลม กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส์ ( $Re$ ) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส์ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ( $TEF$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส์ และอภิปรายผลเปรียบเทียบความแตกต่างและสรุปรูปแบบแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น

#### 5.1 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

##### 5.1.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

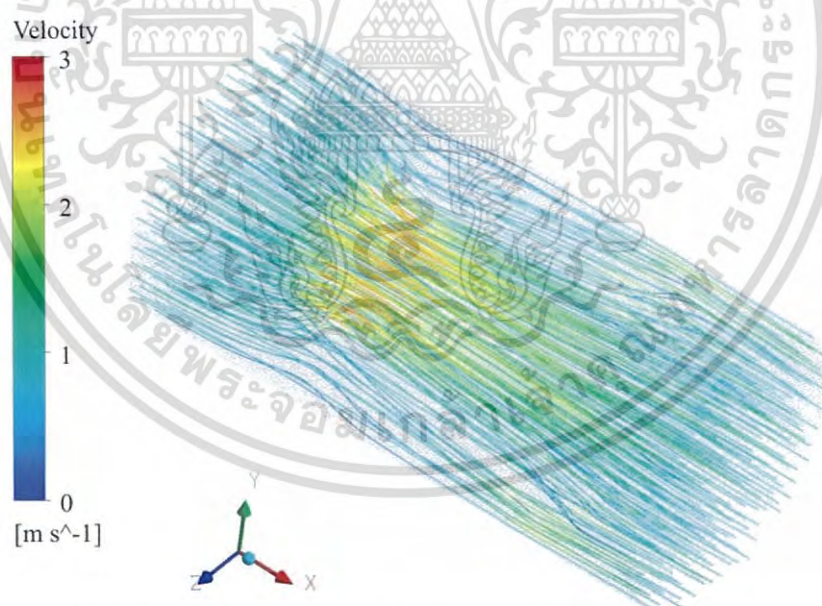
รูปแบบแรกที่ได้ทำการศึกษาคือใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมภายในท่อกลม โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบซี่ทวนกระแสการไหลหรือหันวงแหวนทรงกรวยด้านเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กสวนกระแสการไหลของของไหล โดยกำหนดอัตราส่วนพิตช์ ( $P_R$ ) = 2.0 อัตราส่วนความกว้างทางเข้า ( $D_{R,i}$ ) = 0.6 อัตราส่วนความกว้างทางออก ( $D_{R,o}$ ) = 0.81, 0.97 ความยาวแหวนทรงกรวย ( $L$ ) = 50 มม. การใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมแสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

### 5.1.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมจะแสดงในรูปแบบ 3 มิติ เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลภายในท่อกลมผิวเรียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.2

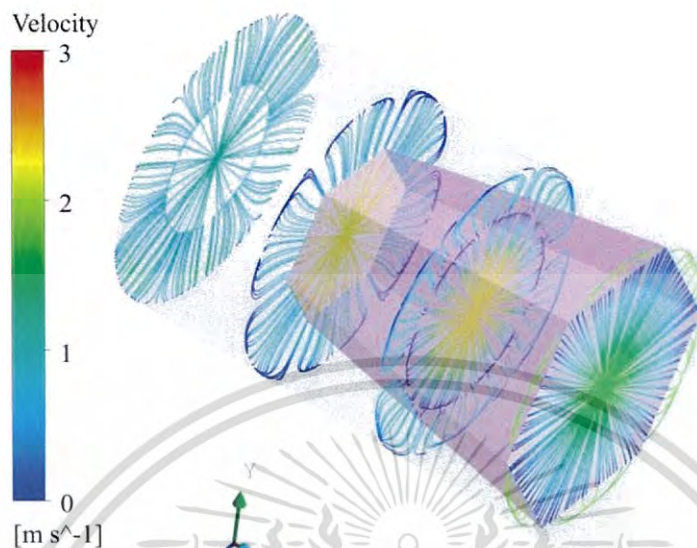


รูปที่ 5.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมภายในท่อกลมผิวเรียบ โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบไหลผ่านแหวนทรงกรวยทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนขึ้น สามารถสังเกตได้จากลักษณะการไหลหมุนวนที่ด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวย แต่กระแสการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นนี้ยังมีจำนวนไม่มากนัก เนื่องจากกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในยังมีเส้นกระแสแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

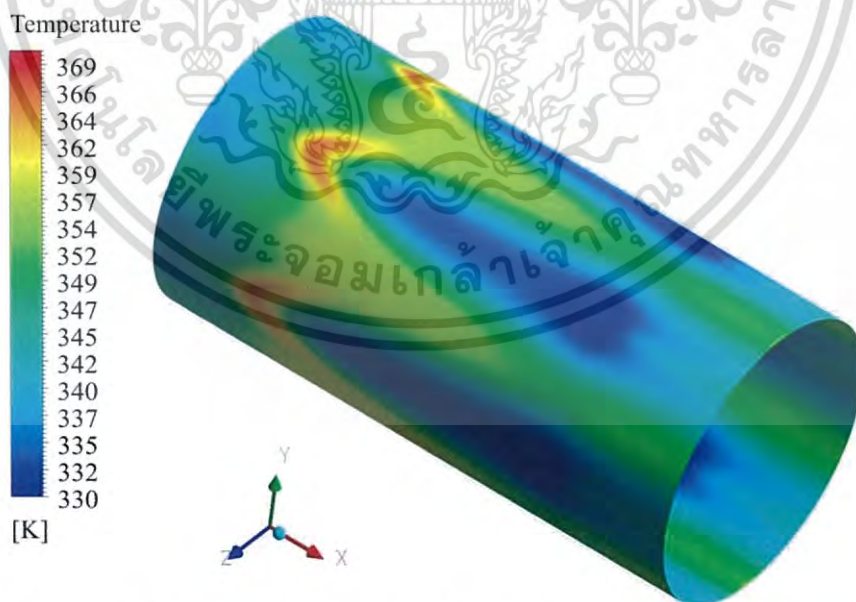
เส้นตรงมากกว่าแบบหมุนวน หากมองภาพในแนวระนาบจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

### 5.1.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมจะพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ ซึ่งจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

จากรูปที่ 5.4 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม

$D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.97$ ,  $P_R = 2.0$  และ  $Re = 3,000$  เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

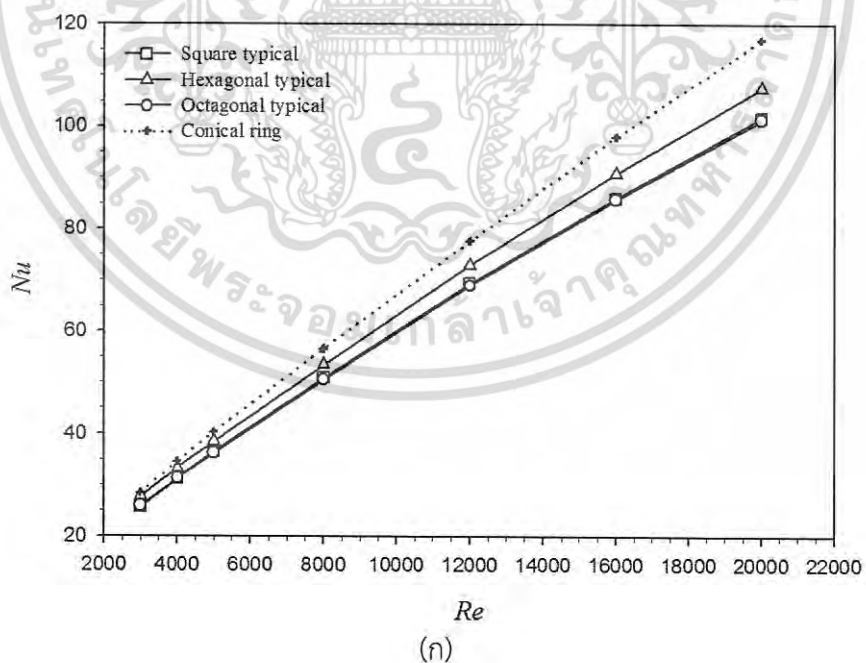
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้นโดยสังเกตได้จากคอนทราสต์สีฟ้าและสีเขียวที่เกิดขึ้นบริเวณผิวท่อ เนื่องจากเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมแบบดั้งเดิมทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนเป็นผลให้ของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกับความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูงเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกันได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังปรากฏคอนทราสต์แดงบริเวณด้านหน้าหรือบริเวณทางเข้าของแหวนทรงกรวยแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่ทางเข้าแหวนทรงกรวยยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อยจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

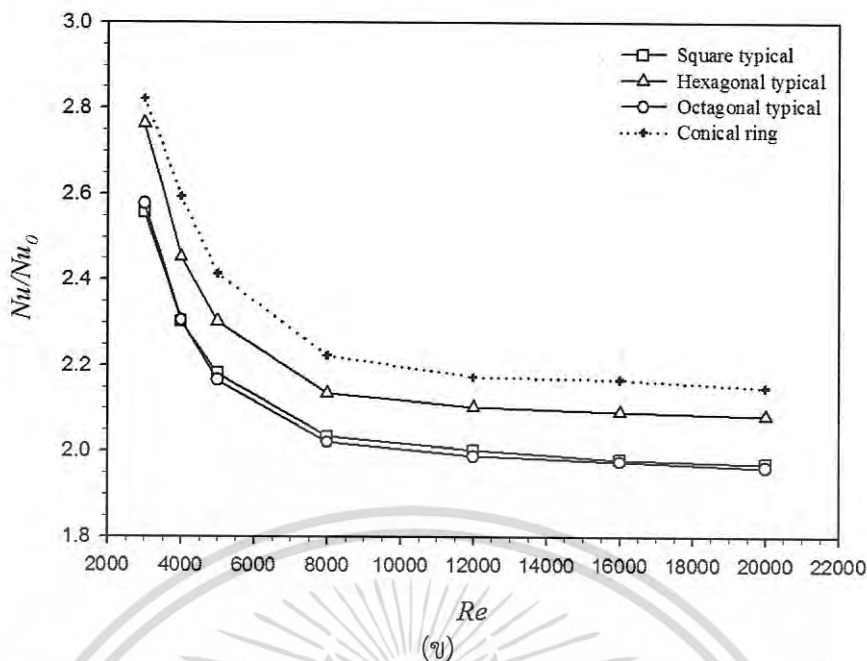
#### 5.1.4 เลขนัสเซลท์และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลท์ ( $Nu$ ) และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยผิวเรียบเมื่อใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81$ ,  $0.97$ ,  $P_R = 2.0$  และ  $Re = 3,000$  ถึง  $20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.5

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง  $27.765-107.52$  ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง  $2.76-2.08$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมเช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมและแปดเหลี่ยมตามลำดับ และเปรียบเทียบกับแหวนทรงกรวยผิวเรียบพบว่าค่าเลขนัสเซลท์และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมมีค่าน้อยกว่าแหวนทรงกรวยผิวเรียบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

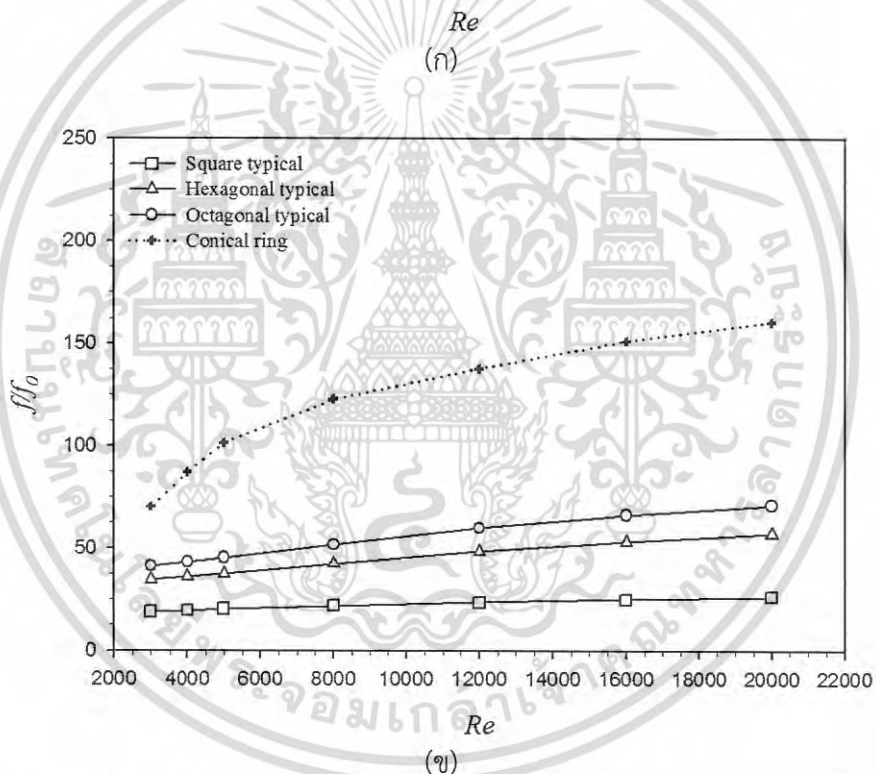
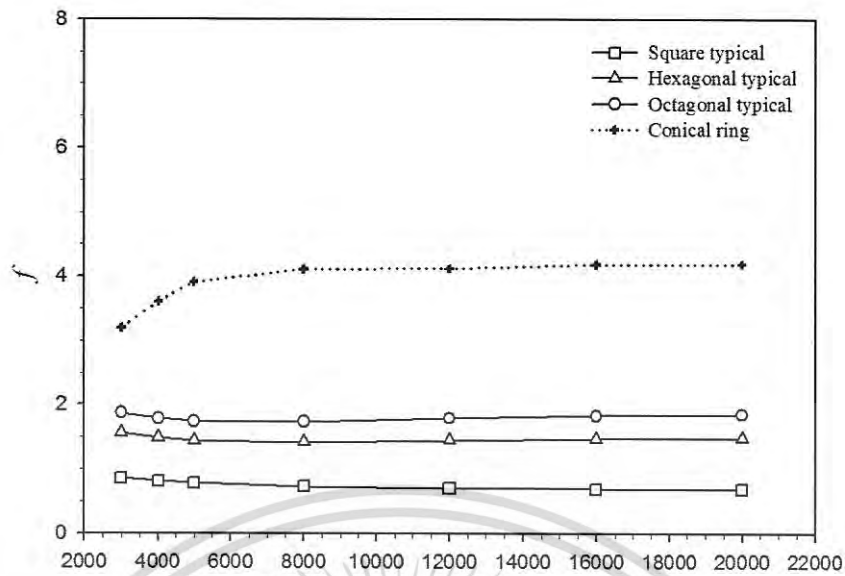


รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยผิวเรียบ (ก)ค่าเลขนัสเซิลท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์

#### 5.1.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยผิวเรียบเมื่อใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81, 0.97$ ,  $P_R = 2.0$  และ  $Re = 3,000$  ถึง  $20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.6

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง  $0.86-0.68$  ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง  $18.81-26.10$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม เช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมตามลำดับ และเปรียบเทียบกับแหวนทรงกรวยผิวเรียบพบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมมีค่าน้อยกว่าแหวนทรงกรวยผิวเรียบอย่างเห็นได้ชัด



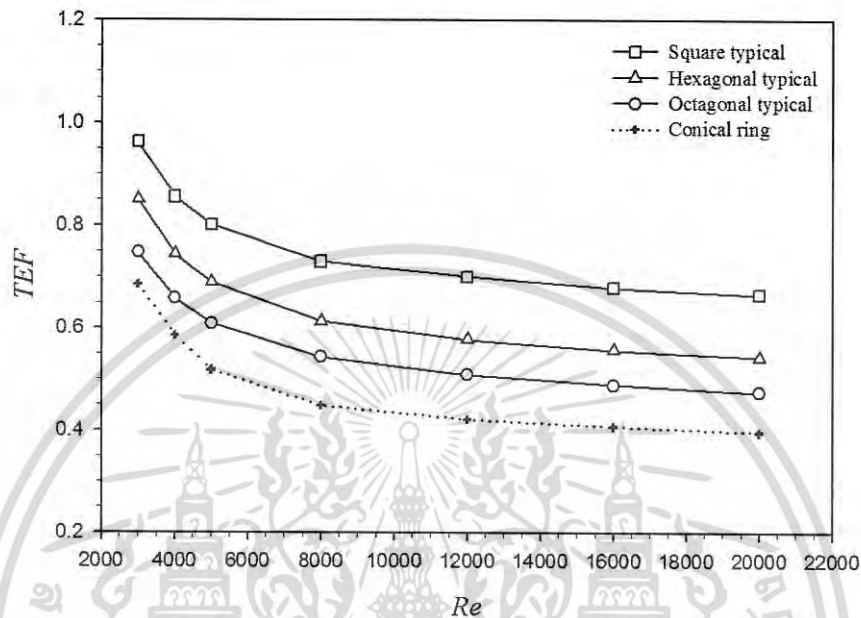
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบตั้งเดิมและแหวนทรงกรวยผิวเรียบ (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) ร่วมกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) พบว่าการใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบตั้งเดิมถึงจะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ที่น้อยลงเมื่อเทียบกับแหวนทรงกรวยผิวเรียบ แต่ก็ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่ต่ำลงมากเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสำหรับชีวิตถึงประสิทธิภาพที่ได้ และเพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้แหวนทรงกรวยได้อย่างเหมาะสมและคุ้มค่าหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.6 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิม

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ( $TEF$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยผิวเรียบเมื่อใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81$ ,  $0.97$ ,  $P_R = 2.0$  และ  $Re = 3,000$  ถึง  $20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยผิวเรียบ

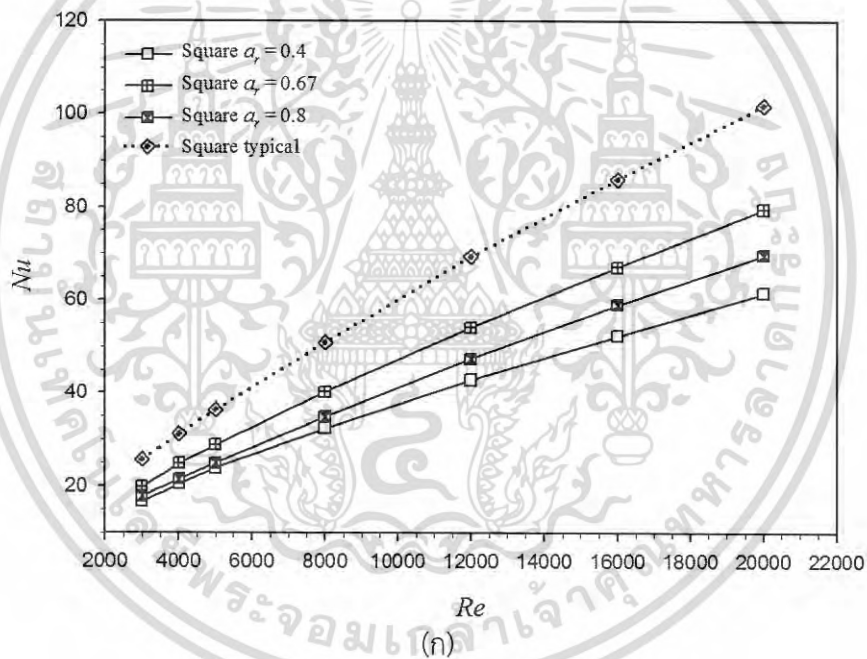
เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 0.96-0.66 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.85-0.54 เท่า และ 0.75-0.47 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ตามลำดับ และพบว่าแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าแหวนทรงกรวยผิวเรียบ

จากการพิจารณารูปที่ 5.7 ข้างต้นพบว่า การใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณผนังได้มากขึ้นแต่ไม่คุ้มค่ากับการศึกษาและการลงทุนในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากการใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมมีค่าประสิทธิภาพที่ต่ำ อันเนื่องมาจากค่าตัวประกอบเสียดทานที่เพิ่มสูงขึ้นมาก ทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้ไม่ดีไปกว่าการใช้ท่อเปล่าผิวเรียบแบบธรรมดา ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยในรูปแบบอื่นๆ ต่อไป เพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทานให้มีค่าลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ด้วยหลักการดังกล่าวนี้จึงเป็นเหตุผลหลักในการเลือกปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4

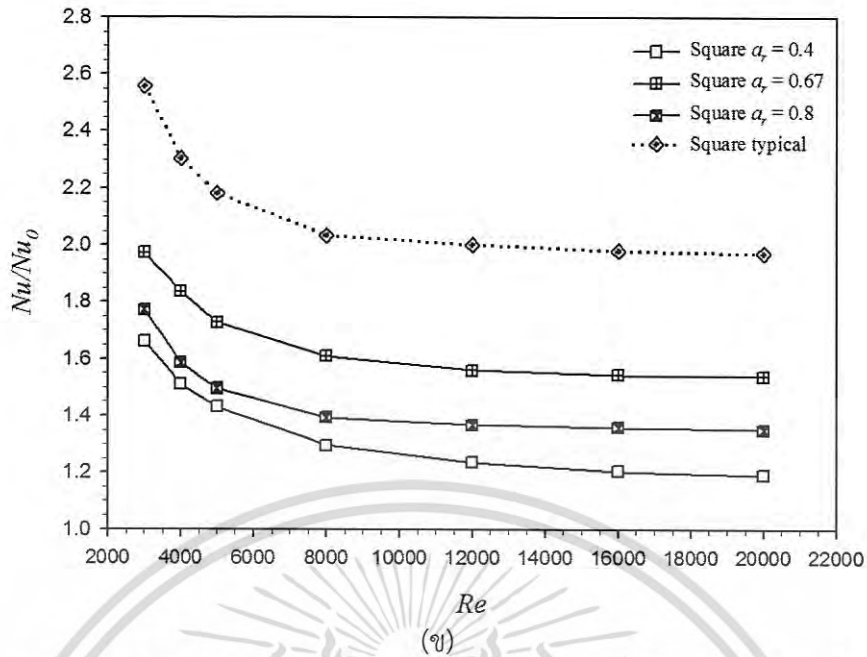
## 5.2 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1

### 5.2.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด aspect ratio)

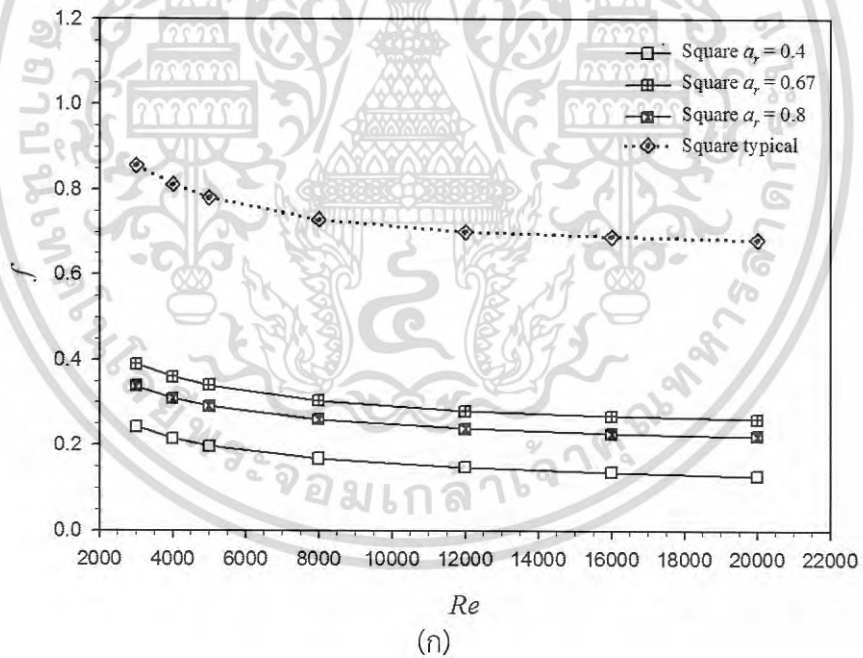
จากการศึกษาการใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมแบบดั้งเดิมทำให้ทราบว่าสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ แต่ยังมีปัญหาค่าตัวประกอบเสียดทานที่ยังสูงและการกระจายของอุณหภูมิยังน้อยที่บริเวณด้านหน้าหรือบริเวณทางเข้าของแหวนทรงกรวย ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 1 คือการลดอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของแหวนทรงกรวย (aspect ratio,  $a_r$ ) ทั้งทางเข้าและทางออก ซึ่งคาดว่าจะลดพื้นที่ขวางการไหลให้น้อยลงและช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานลงได้ แต่การลด  $a_r$  นั้นจำเป็นที่จะต้องหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดให้ได้เสียก่อนจึงจะหาค่าตัวแปรอื่นๆ ต่อไป จึงได้ทำการทดลองลดค่า  $a_r$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมที่มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดจากหัวข้อก่อนหน้านี้ลงไปให้อัตราส่วน 0.4, 0.67 และ 0.8 ทั้งสิ้น 3 ขนาด โดยค่าเลขนัสเซลล์ต์และค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ ค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จะถูกนำเสนอรูปที่ 5.8, 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ



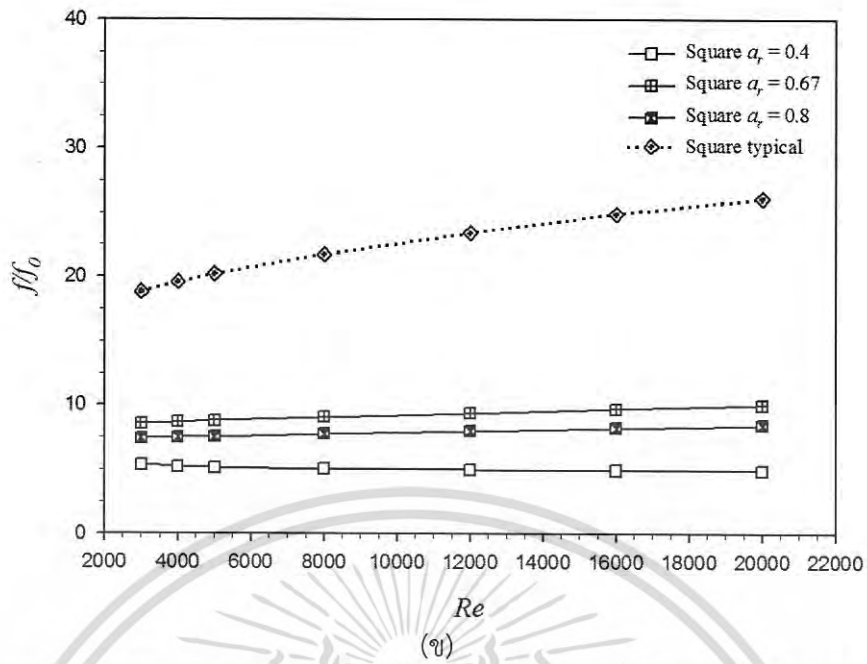
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



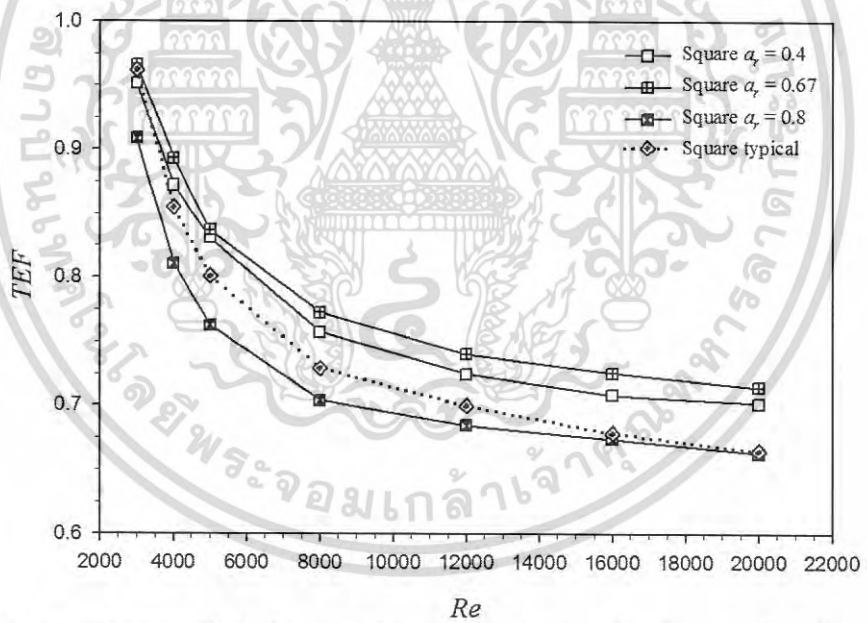
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมที่  $\alpha_r$  ขนาดต่างๆ (ก)ค่าเลขนัสเซิลท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมที่  $\alpha_r$  ขนาดต่างๆ (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมที่  $\alpha_r$  ขนาดต่างๆ

จากผลที่ได้ดังรูปที่ 5.8-5.10 สามารถสรุปได้ว่าค่า  $\alpha_r$  ที่เหมาะสมที่สุดกับแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 มีค่าเท่ากับ  $\alpha_r = 0.67$  โดยให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดในช่วง 0.97-0.71 ที่  $Re = 3,000-20,000$  ซึ่งสูงกว่า  $\alpha_r = 0.4$  และ 0.8 และสูงกว่าแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมอีกด้วย ดังนั้นในการศึกษาตัวแปรอื่นๆ ของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 จะยึดค่า  $\alpha_r = 0.67$  เป็นหลักต่อไป ตัวอย่างดังรูป 5.11

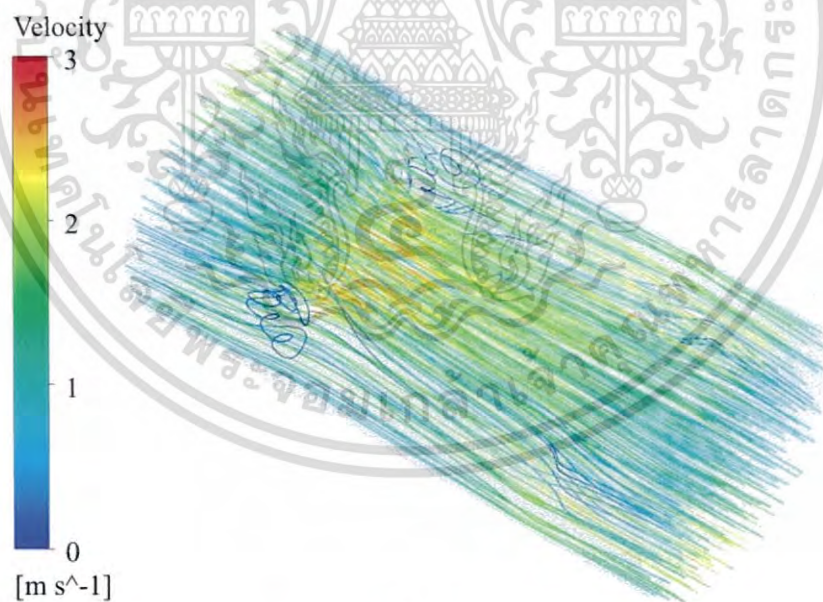
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1

### 5.2.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด aspect ratio)

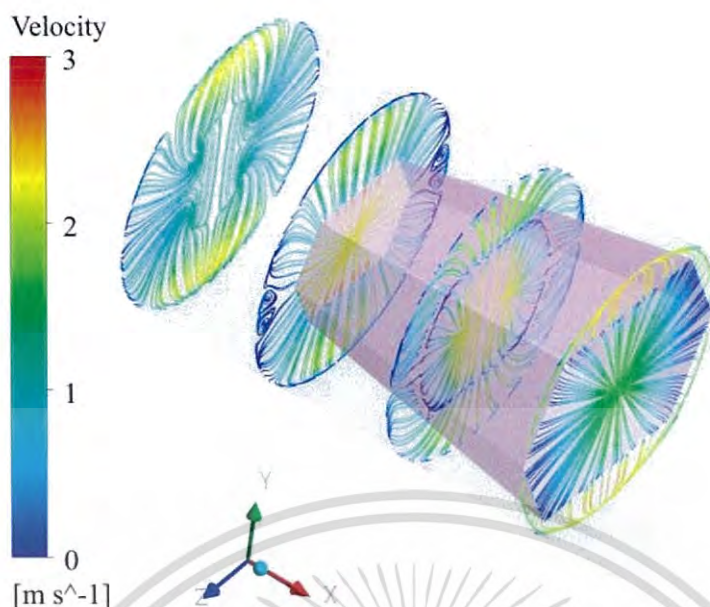
เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 จะแสดงในรูปแบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลภายในท่อกลมผิวเรียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 ภายในท่อกลมสามารถทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะการไหลเกิดการหมุนวนที่ด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวยมีมากกว่าแบบดั้งเดิม หากมองภาพในแนวระนาบจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

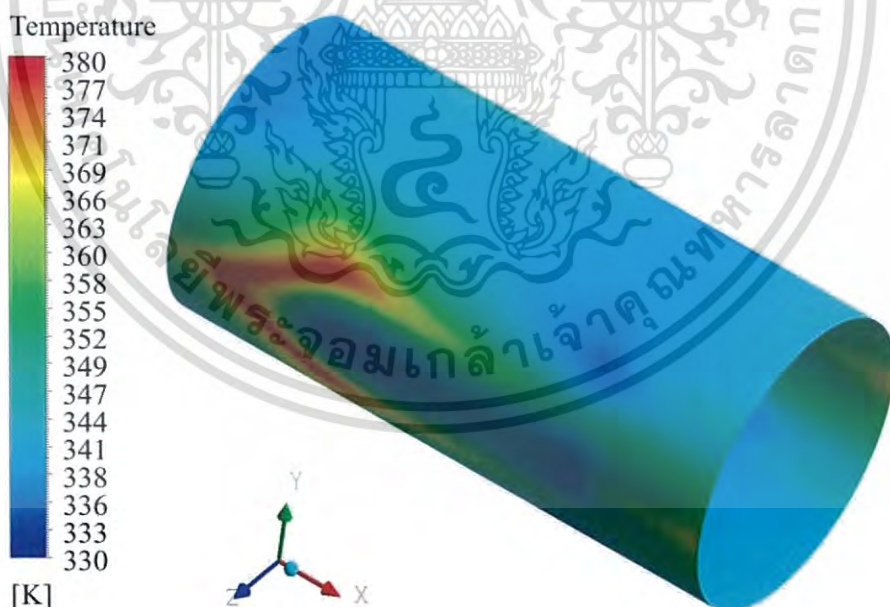


รูปที่ 5.13 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1

### 5.2.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1

(ลด aspect ratio)

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 ภายในท่อกลมผิวเรียบ จะถูกพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ และแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1

จากรูปที่ 5.14 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนทรงกรวย  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.97$ , aspect ratio = 0.67,  $P_R = 2.0$  และ  $Re = 3,000$  เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 หรือแบบลด aspect ratio เหลือ 0.67 ภายในท่อกลม จะช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิได้มากยิ่งขึ้น สังเกตได้จากคอนทัวร์สี

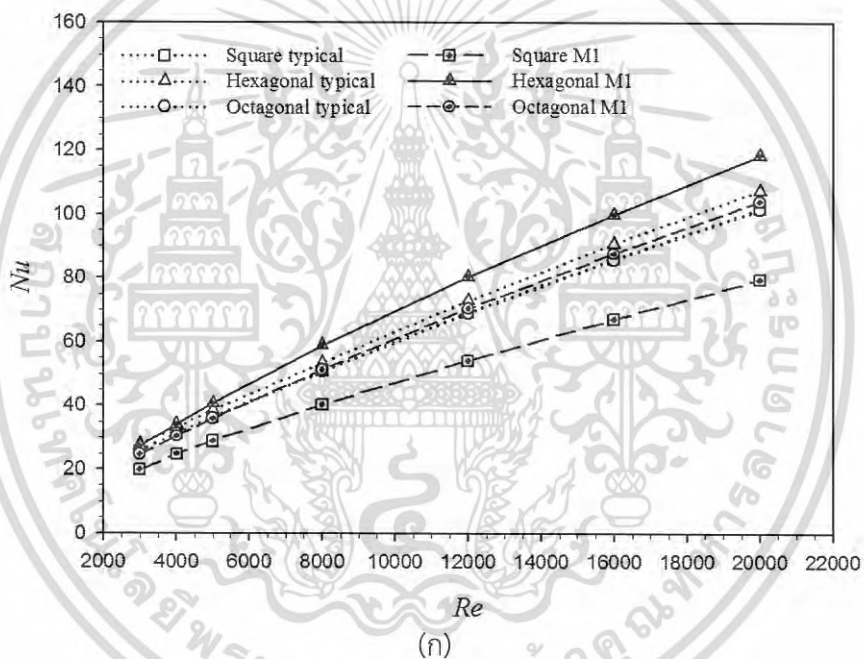
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียประโยชน์ทางธุรกิจ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขี้ยวและสีฟ้าที่มีมากขึ้นเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 ลงไป ทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้นเป็นผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกับความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูงได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังปรากฏคอนทัวร์สีแดงบริเวณด้านข้างของทางเข้าแหวนทรงกรวย แสดงให้เห็นว่าบริเวณด้านข้างของทางเข้าแหวนทรงกรวยยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อยจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

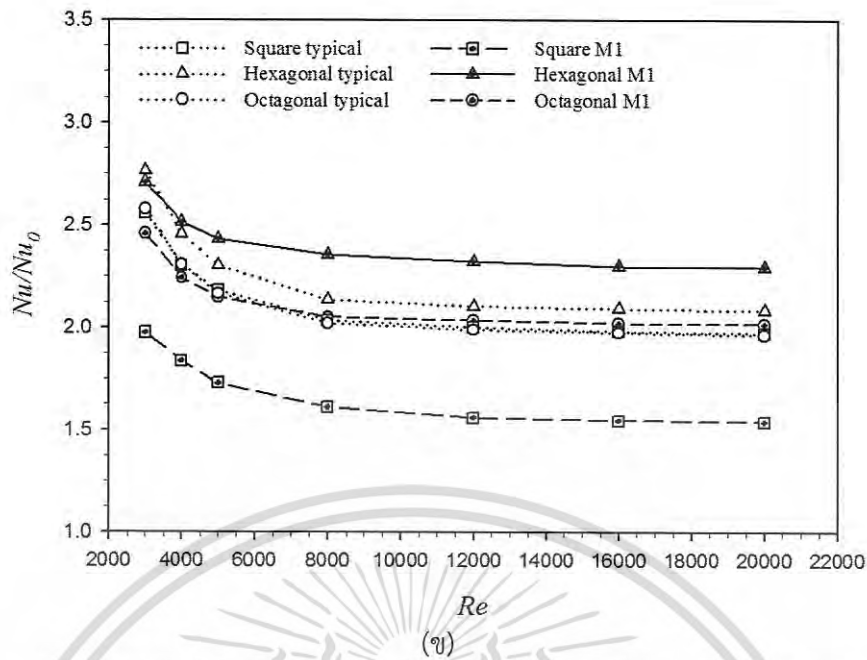
#### 5.2.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1

(ลด aspect ratio)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลล์ท์ ( $Nu$ ) และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81$ ,  $0.97$ ,  $P_R = 2.0$  และ  $Re = 3,000$  ถึง  $20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



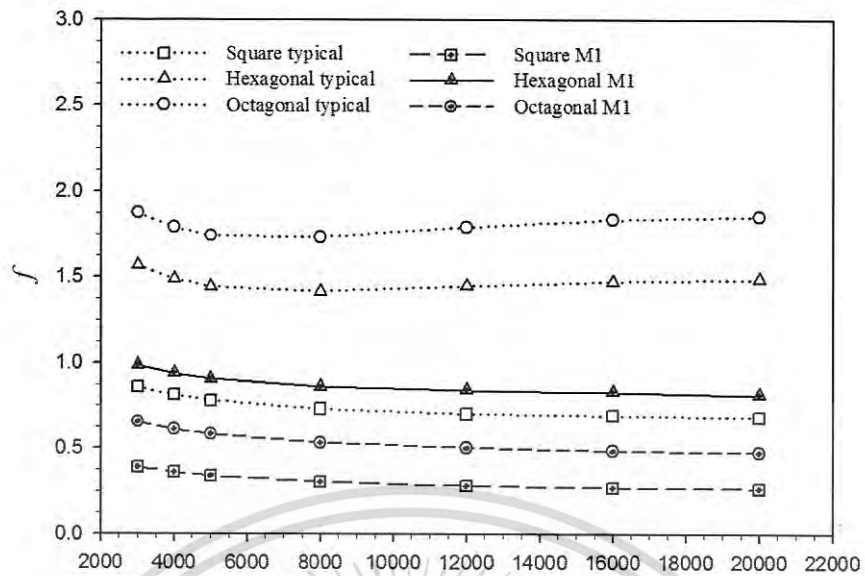
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 เทียบกับแบบดั้งเดิม (ก)ค่าเลขนัสเซลท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 27.19-118.52 ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 2.71-2.29 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมเช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือแหวนทรงกรวยแปดเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จากการปรับปรุงแบบที่ 1 มีค่ามากกว่าแบบดั้งเดิม ยกเว้นในกรณีของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมที่ได้ค่าน้อยกว่าแบบดั้งเดิม

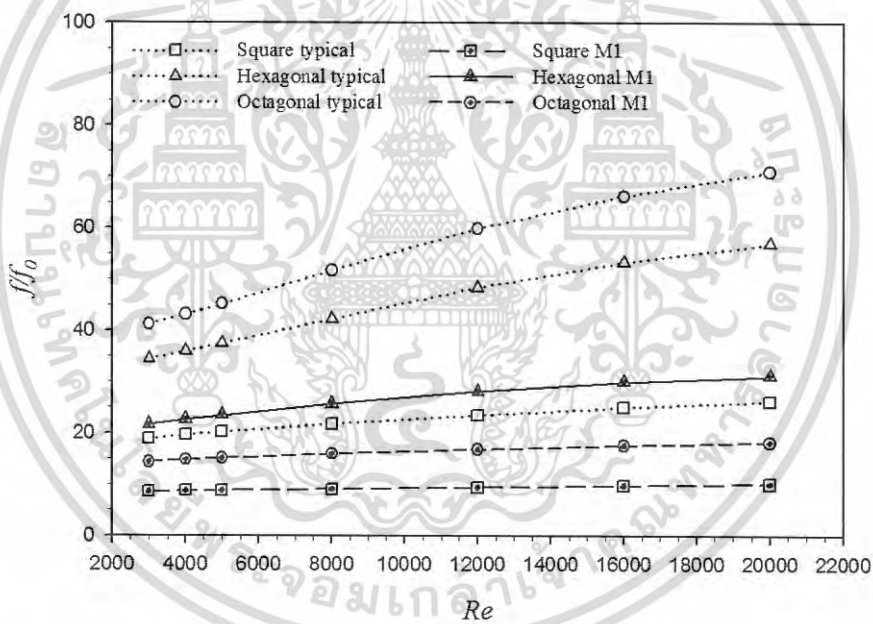
#### 5.2.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1

(ลด aspect ratio)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81, 0.97$ ,  $P_R = 2.0$  และ  $Re = 3,000$  ถึง  $20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.16



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับรูปแบบที่ 1 เทียบกับแบบดั้งเดิม (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

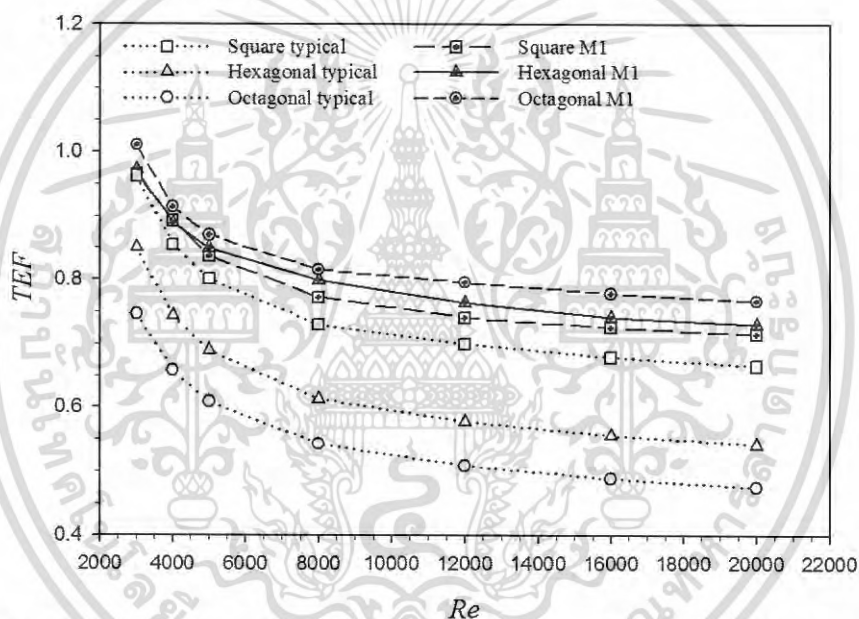
เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.39-0.26 ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 8.54-10.01 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม เช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือค่าจากแหวนทรงกรวยแปดเหลี่ยมและหกเหลี่ยมตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบดั้งเดิมดังกราฟข้างต้น พบว่าแบบปรับปรุง 1 มีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยกว่าแบบดั้งเดิมตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ ( $Nu/Nu_0$ ) ร่วมกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) พบว่าการใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ที่ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิมมากนัก แต่ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่ลดลงอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสำหรับชีวิตถึงประสิทธิภาพที่ได้ และเพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 ว่ามีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบดั้งเดิมหรือไม่

### 5.2.6 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 (ลด aspect ratio)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ( $TEF$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.97$ ,  $P_R = 2.0$  และ  $Re = 3,000$  ถึง  $20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 เทียบกับแบบดั้งเดิม

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 1.01-0.77 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยแปดเหลี่ยม ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือค่าจากแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.97-0.73 เท่า และ 0.97-0.71 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ตามลำดับ

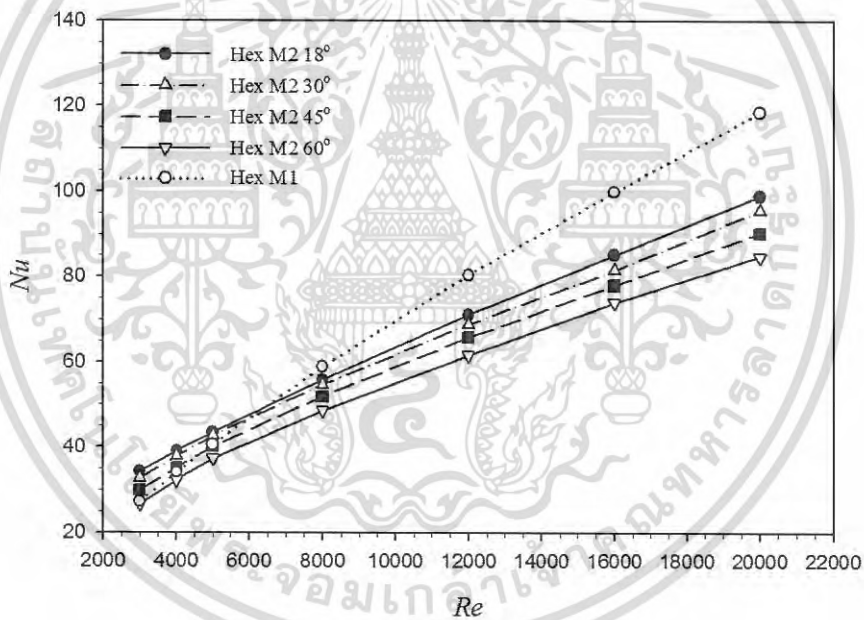
จากการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 1 โดยการลด aspect ratio,  $a_r$  มีผลช่วยให้ค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงและค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้นกว่าแบบแหวนกรวยแบบดั้งเดิม แต่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้ยังมีค่าที่ไม่สูงพอสำหรับการนำไปใช้ จึงได้ทำการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 2 ขึ้น โดยเพิ่มการปรับปรุงด้านทางเข้าของกรวยเป็นทรงกลม จุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมลงโดยการลดมุมปะทะของแหวนกรวย และยังสามารถสร้างความปั่นป่วนให้กับของไหลได้เช่นเดิม ซึ่งคาดหวังว่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ขาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.3 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2

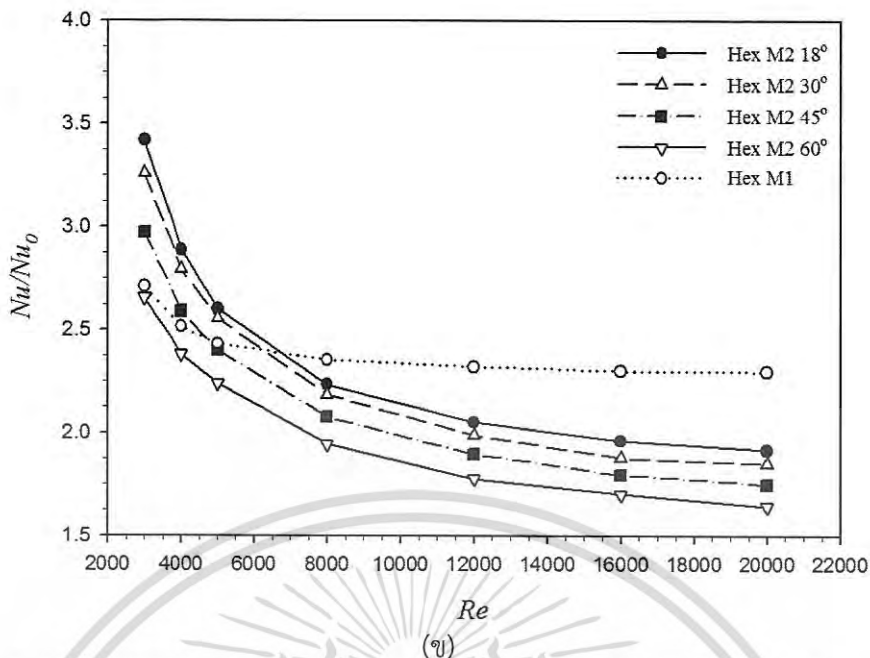
### 5.3.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงกลม)

จากการศึกษาการใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 1 เมื่อพิจารณาแล้ว ค่าตัวประกอบเสียดทานที่ยังสูงนั้นเกิดมาจากแหวนทรงกรวยได้กีดขวางการไหลของของไหลอยู่มาก จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงแหวนทรงกรวยเพื่อลดมุมปะทะกับของไหลลง เพื่อลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อน จึงเป็นที่มาของการปรับปรุงแหวนทรงกรวย โดยการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่ด้านทางเข้าให้เป็นทรงกลม แต่การปรับปรุงทางเข้าให้เป็นรูปกลีมนั้น จำเป็นที่จะต้องหามุมปะทะที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดให้ได้เสียก่อน จากนั้นจึงจะทำการศึกษาที่ตัวแปรอื่นๆต่อไปได้ จึงได้ทำการทดลองปรับปรุงมุมปะทะของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมที่ aspect ratio = 0.67 ให้เป็นทรงกลมที่มุม  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  และมุมขนาดเล็กสุดเท่าที่จะได้  $18^\circ$  ทั้งสิ้น 4 มุม โดยค่าเลขนัยเซลล์และอัตราส่วนเลขนัยเซลล์ ค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จะถูกนำเสนอรูปที่ 5.18, 5.19 และ 5.20 ตามลำดับ

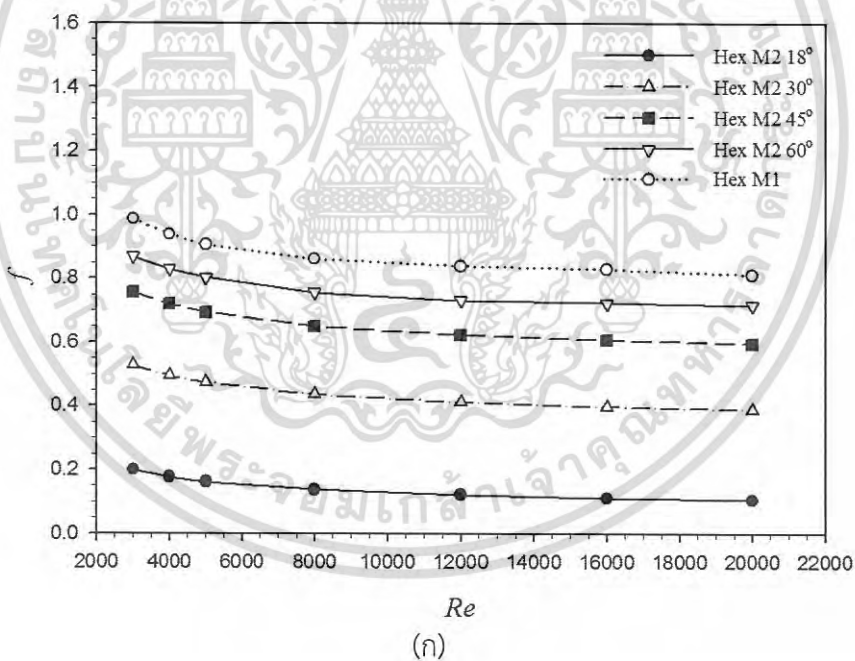


(ก)

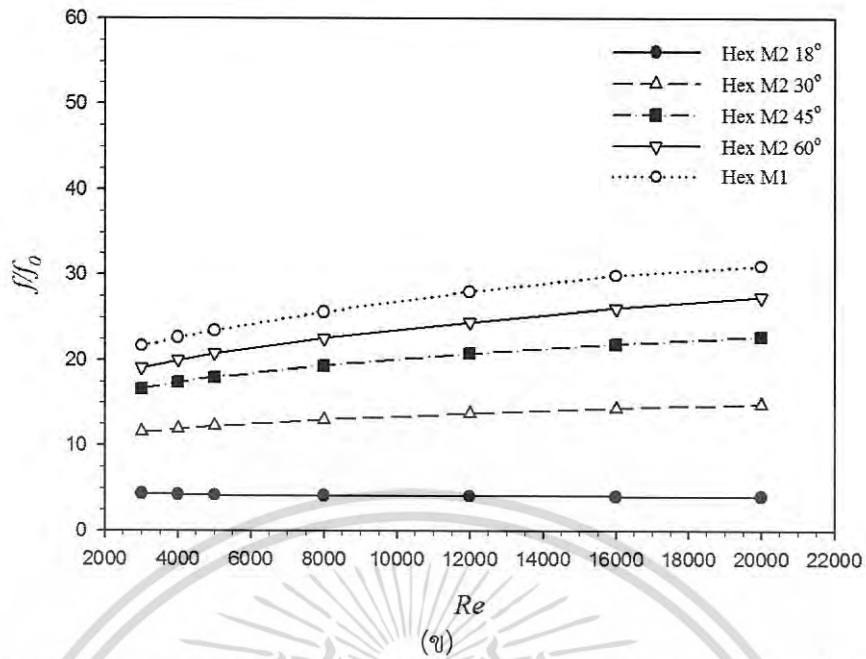
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



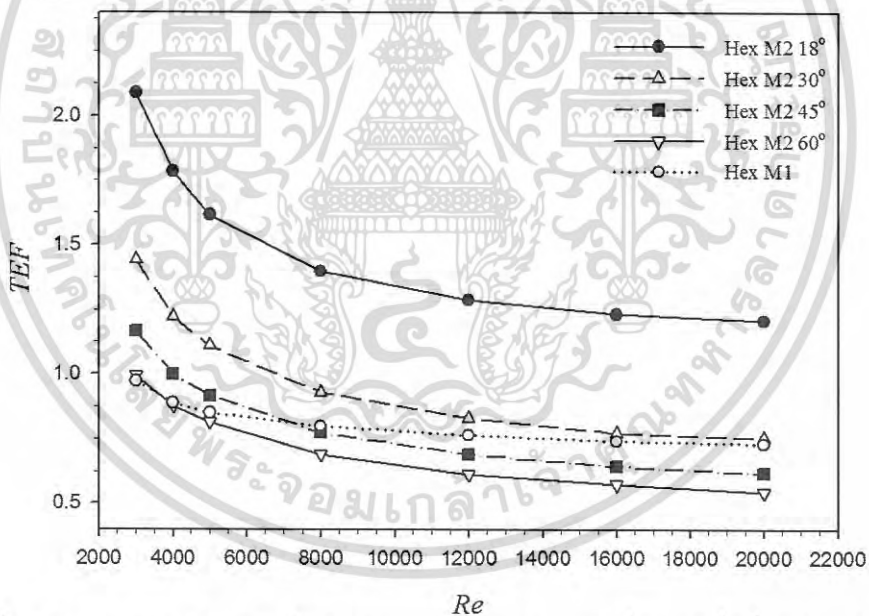
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมทรงกลมที่มุมปะทะต่างๆ (ก)ค่าเลขนัสเซิลท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมทรงกลมที่มีมุมปะทะต่างๆ (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน



รูปที่ 5.20 สมรรถนะเชิงความร้อนของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมทรงกลมที่มีมุมปะทะต่างๆ

จากผลการเปรียบเทียบข้างต้นพบว่าแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมที่มีมุมปะทะเล็กที่สุดที่  $\alpha_1 = 18^\circ$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด อันเนื่องมาจากสามารถสร้างการไหลที่ปั่นป่วนซึ่งช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน อีกทั้งยังลดค่าตัวประกอบเสียดทานได้มากกว่าแบบปรับปรุง 1 และมุมปะทะขนาดอื่นๆ ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าที่มากที่สุด ดังนั้นในการศึกษาแหวนทรงกรวยกลมจะยึดที่มีมุมปะทะเล็กที่สุด (สี่เหลี่ยม  $\alpha_1 = 15.2^\circ$ , หกและแปดเหลี่ยม  $\alpha_1 = 18^\circ$ ) เป็นสำคัญ โดยแสดงตัวอย่างของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมได้ดังรูปที่ 5.21

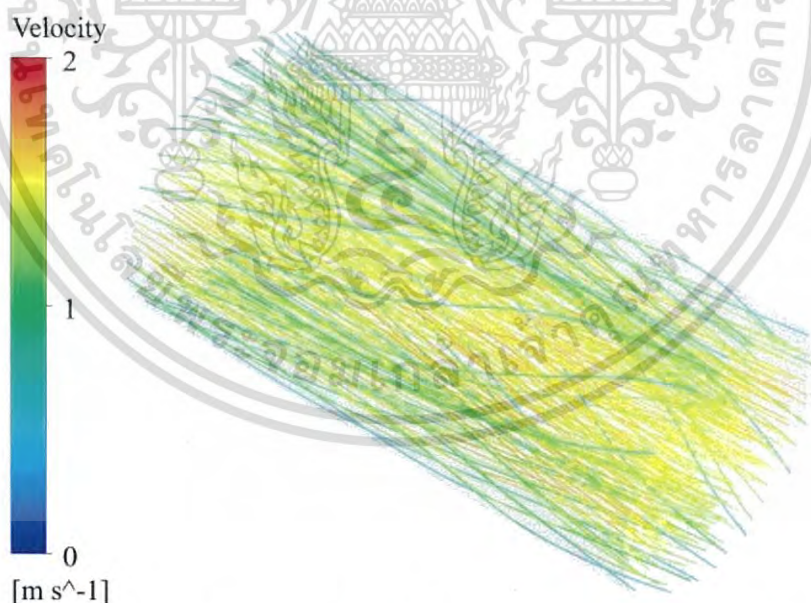
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 รูปทรงของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยทรงหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2

### 5.3.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงกลม)

เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 จะแสดงในรูปแบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลภายในท่อกลมผิวเรียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.22

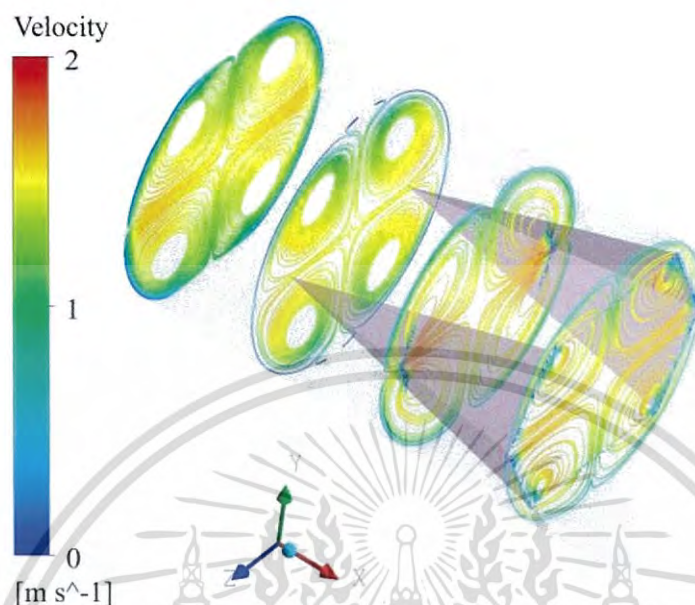


รูปที่ 5.22 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 ทรงกลม ( $\alpha_1 = 15.2^\circ$  และ  $18^\circ$ ) ภายในท่อกลมสามารถทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะการไหลเกิดการหมุนวนที่ด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวยมีมากกว่าแบบดั้งเดิม หากมองภาพในแนว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นว่ามีกระแสการไหลหมุนวน 2 คู่ ที่ช่วยเหนี่ยวนำกระแสการไหลให้รุนแรงและกระแทกเข้ากับผิวท่อกลมซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.23

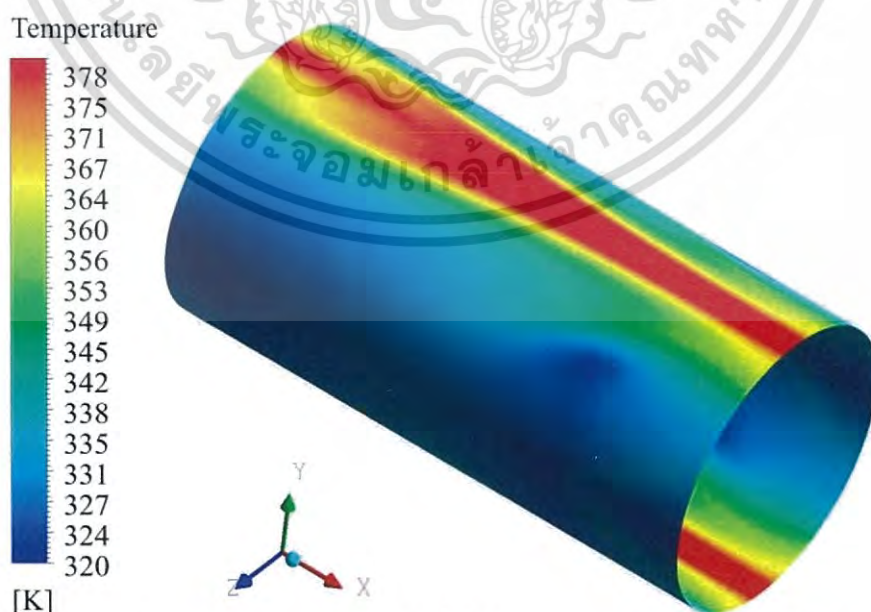


รูปที่ 5.23 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2

### 5.3.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2

(ทรงกลม)

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 หรือการปรับปรุงทรงกลมที่ทางเข้าแหวนทรงกรวยภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิแล้วนั้นจะสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.24



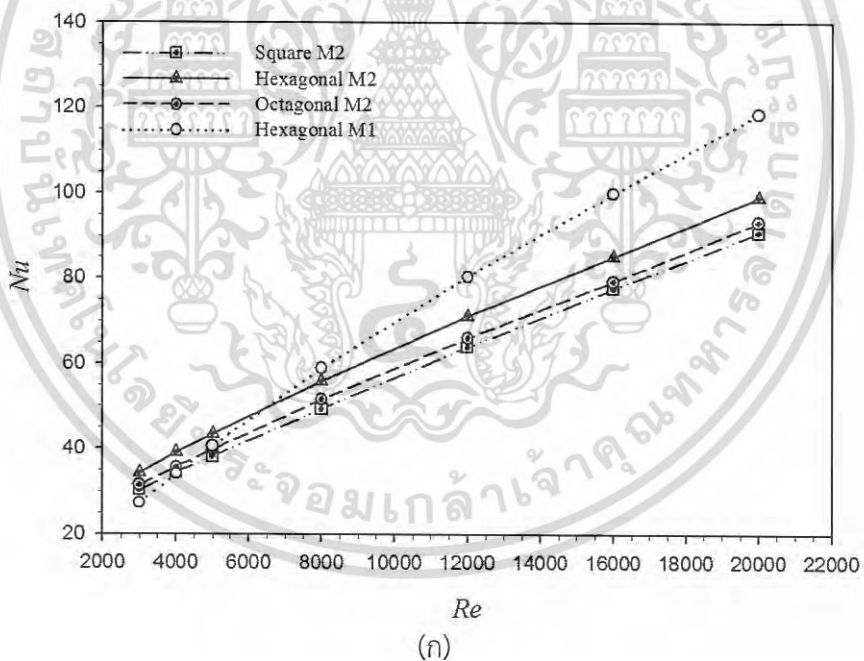
รูปที่ 5.24 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

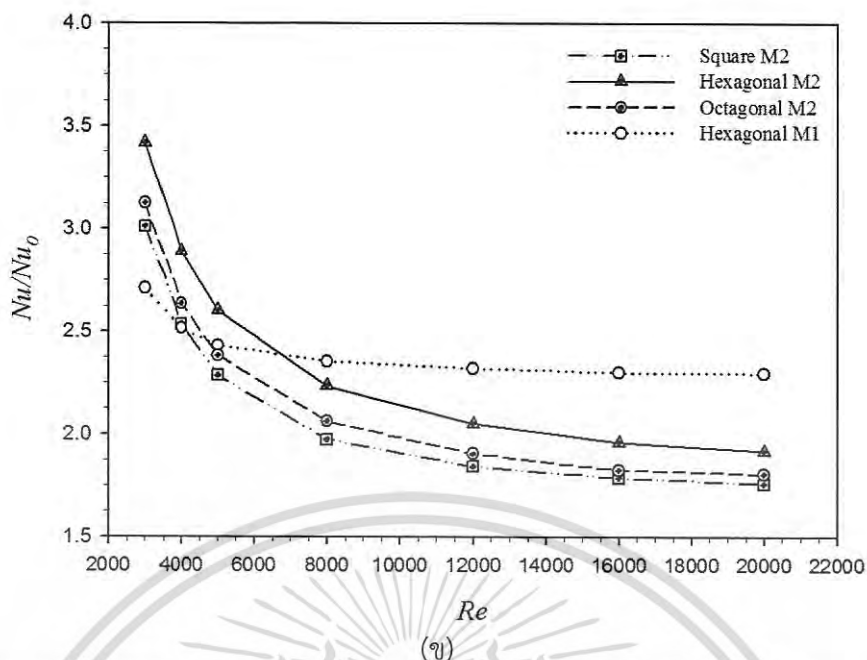
จากรูปที่ 5.24 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.97$ ,  $a_r = 0.67$ ,  $P_R = 2$ ,  $\alpha_1 = 18^\circ$ , และ  $Re = 3,000$  เมื่อพิจารณาคอนทิวรัวของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 หรือแบบสร้างมุมปะทะที่ด้านหน้าของแหวนทรงกรวยให้เป็นทรงกลมภายในท่อกลม สามารถช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากคอนทิวรัวสีเขียวและสีฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 ทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อกับบริเวณผนังท่อได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีคอนทิวรัวแดงปรากฏอยู่บริเวณกึ่งกลางผิวท่อทั้งบนและล่าง แสดงให้เห็นว่าบริเวณกึ่งกลางผิวท่อทั้งบนและล่างยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อยจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

#### 5.3.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลท์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงกลม)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลท์ ( $Nu$ ) และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81, 0.97$ ,  $a_r = 0.67$ ,  $P_R = 2.0$ ,  $\alpha_1 = (15.2^\circ \text{ และ } 18^\circ)$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 3,000$  ถึง  $20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

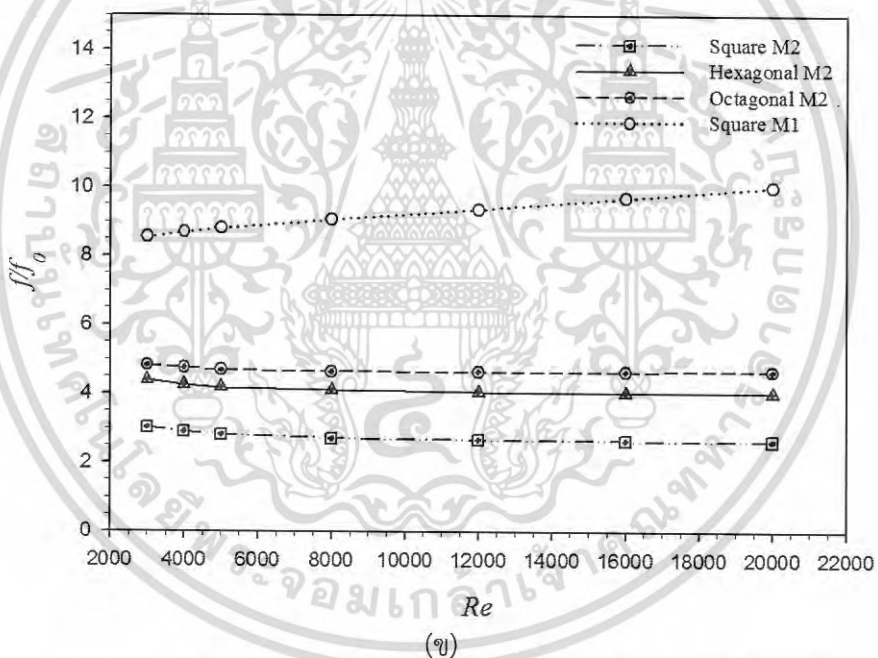
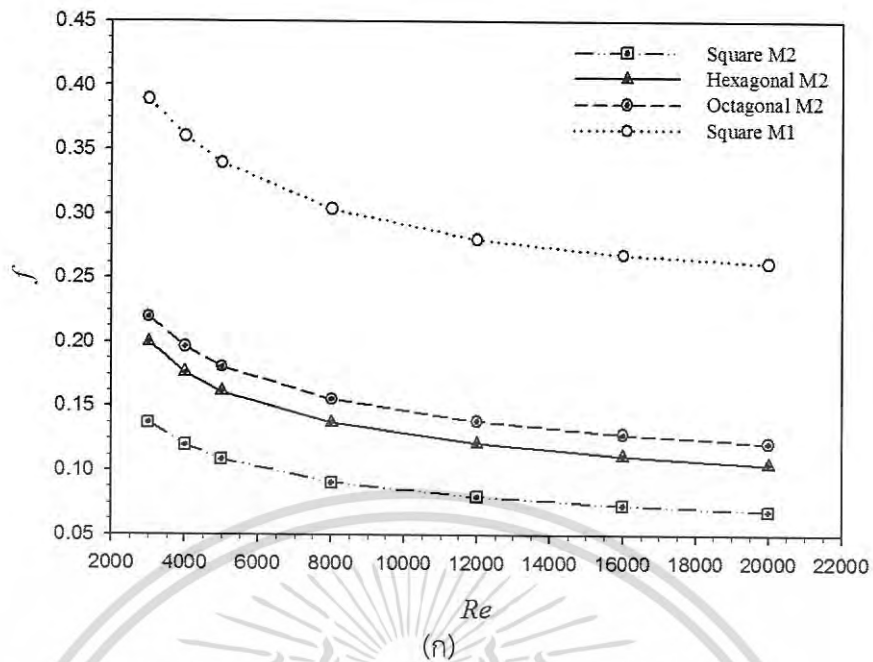


รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 เทียบกับแหวนทรงแท้ปรับปรุงแบบที่ 1 (ก)ค่าเลขนัสเซลท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 34.32-98.94 ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยทรงแท้ และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 3.42-1.92 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยทรงแท้เช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือแหวนทรงกรวยแปดเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมตามลำดับ โดยค่าที่ได้้น้อยกว่าค่าจากแหวนทรงกรวยทรงแท้ที่มีค่ามากที่สุดจากแบบปรับปรุง 1

### 5.3.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงกลม)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.97$ ,  $P_R = 2.0$ ,  $\alpha_1 = (15.2^\circ \text{ และ } 18^\circ)$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส์  $Re = 3,000$  ถึง  $20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.26



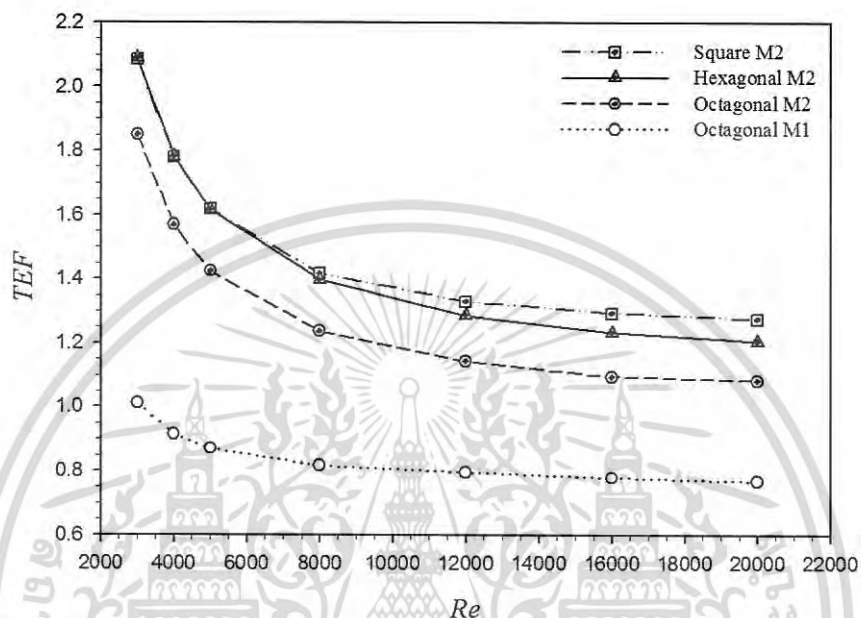
รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 เทียบกับแหวนปรับปรุงแบบที่ 1 (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง  $0.14-0.07$  ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง  $3.01-2.61$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม เช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมตามลำดับ โดยค่าที่ได้น้อยกว่าค่าจากแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมที่มีค่าน้อยที่สุดจากแบบปรับปรุง 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.6 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ้ม)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ( $TEF$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81$ ,  $0.97$ ,  $P_R = 2.0$ ,  $\alpha_1 = (15.2^\circ \text{ และ } 18^\circ)$  และช่วงเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 3,000$  ถึง  $20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 เทียบกับแหวนปรับปรุงแบบที่ 1

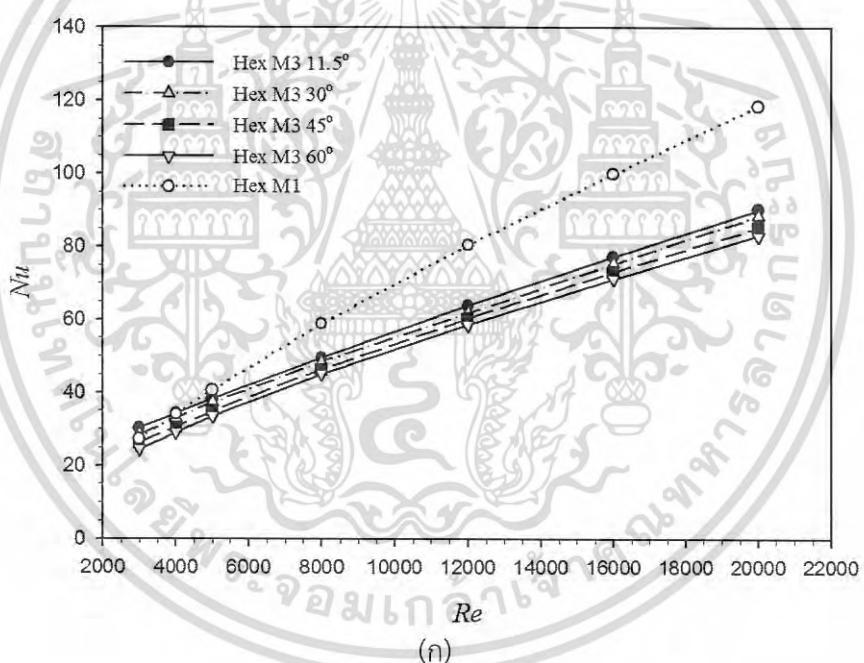
เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 2.09-1.28 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.09-1.21 เท่า และ 1.85-1.08 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ตามลำดับ

จากการปรับปรุงแบบที่ 2 โดยการทำมุมปะทะที่ด้านหน้าของแหวนทรงกรวยแบบทรงลิ้ม ทำให้ลดพื้นที่ของกรวยที่ขวางการไหลให้มีขนาดเล็กกลงได้ ส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนดีกว่าการใช้เพียงแบบปรับปรุง 1 โดยค่าที่ได้มากกว่าค่าจากแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมที่มีค่ามากที่สุดจากแบบปรับปรุง 1 จึงเกิดแนวคิดต่อมาคือหากทำการทดลองเพิ่มเติมโดยทำมุมเป็นทรงลิ้มกลับทิศ เนื่องจาก การสร้างลิ้มกลับทิศสามารถลดมุมปะทะที่ด้านหลังได้มากกว่าด้านหน้าแบบทรงลิ้ม และคาดหวังว่าการลดมุมปะทะที่ทำได้มากขึ้นนี้จะช่วยลดพื้นที่ขวางการไหลลง และช่วยให้ค่าความดันตกคร่อมลดลงและส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

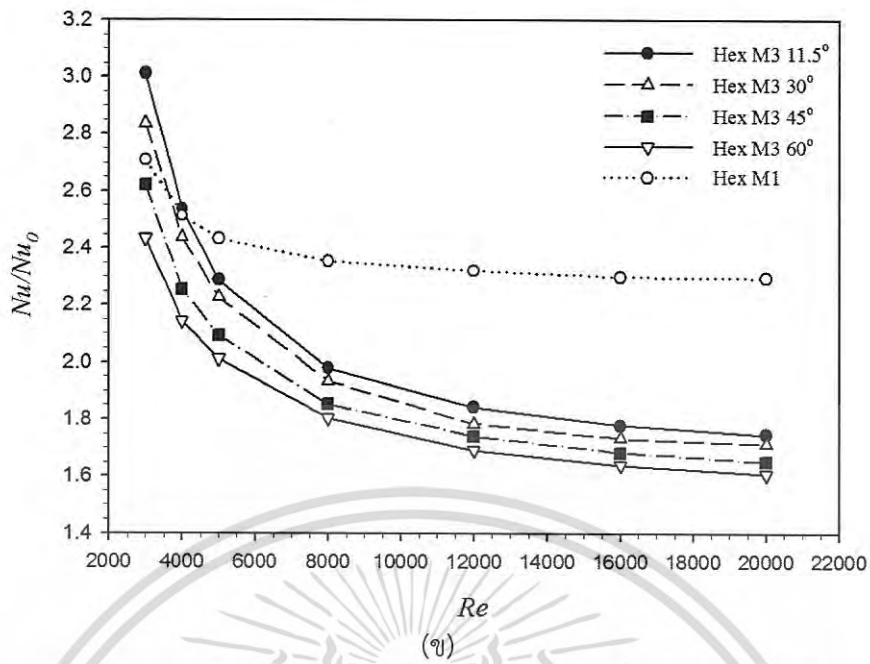
## 5.4 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3

### 5.4.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ่มกลับทิศ)

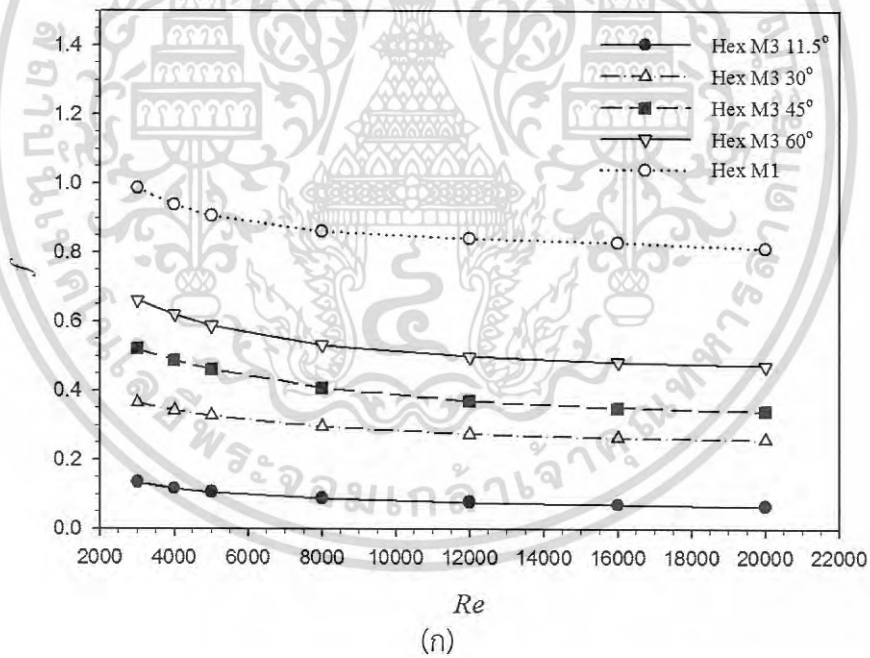
จากการศึกษาการปรับปรุงแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 ที่ผ่านมา จึงทำให้ทราบว่า การสร้างมุมปะทะสามารถช่วยให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลงและช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้มากขึ้นได้ แต่เนื่องจากการทำมุมปะทะที่ด้านหน้าแหวนทรงกรวยสามารถทำมุมให้เล็กลงได้ในระดับหนึ่ง จึงเป็นที่มาของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 3 (ทรงลิ่มกลับทิศ) เนื่องจากการทำมุมปะทะที่ด้านหลังของแหวนทรงกรวยแบบทรงลิ่มกลับทิศสามารถทำมุมปะทะให้เล็กลงได้มากกว่าแบบทรงลิ่ม แต่การทำมุมเป็นทรงลิ่มกลับทิศนั้นจำเป็นที่จะต้องหามุมปะทะที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเสียก่อน จึงจะทำการศึกษาที่ตัวแปรอื่นๆ ต่อไปได้ จึงได้ทำการสร้างมุมปะทะของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมที่ aspect ratio = 0.67 ให้เป็นทรงลิ่มกลับทิศที่มุม  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  และมุมขนาดเล็กสุดเท่าที่จะตัดได้  $11.5^\circ$  ทั้งสิ้น 4 มุม โดยค่าเลขนัยเลขทและค่าอัตราส่วนเลขนัยเลขท ค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จะถูกนำเสนอรูปที่ 5.28, 5.29 และ 5.30 ตามลำดับ



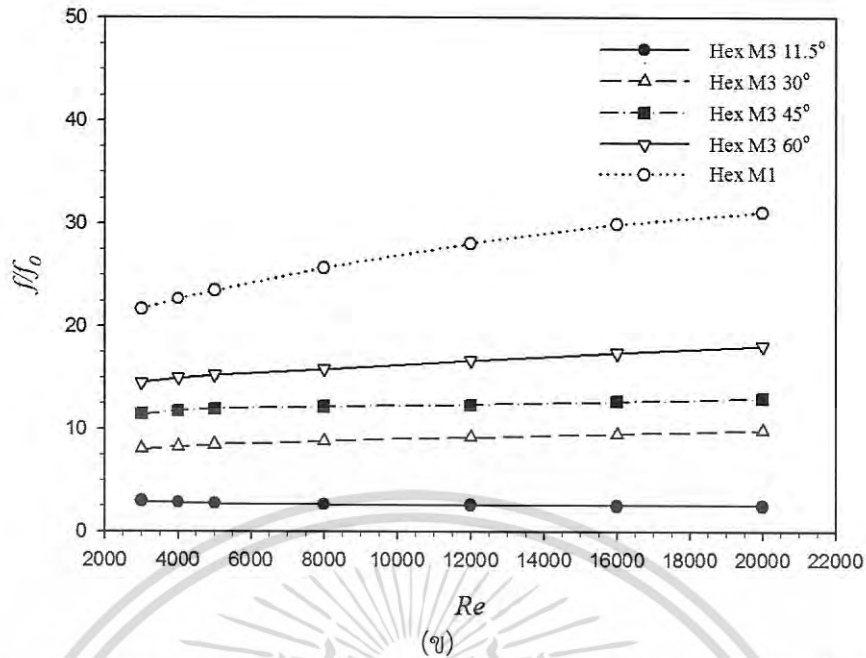
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



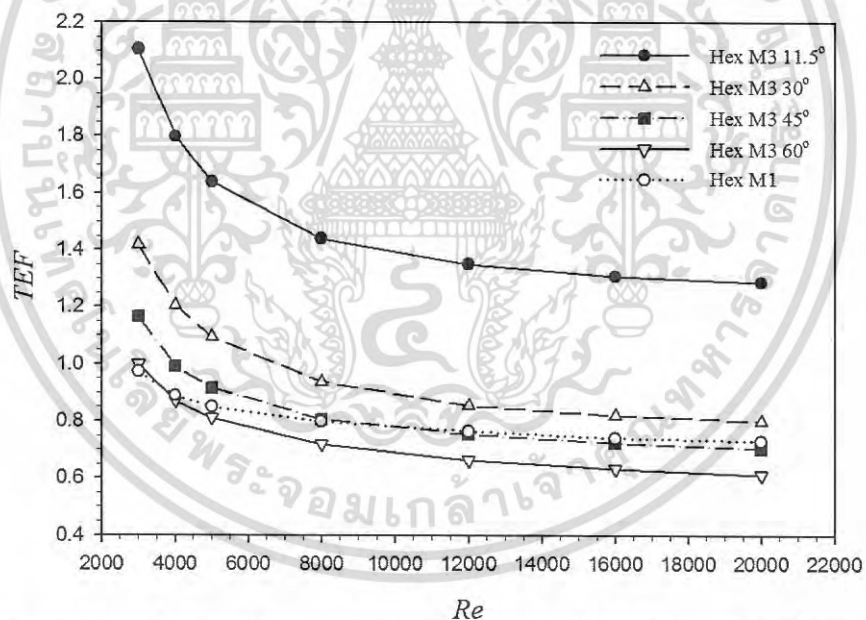
รูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมทรงกลมกลับทิศที่มีมุมปะทะต่างๆ (ก)ค่าเลขนัสเซิลท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



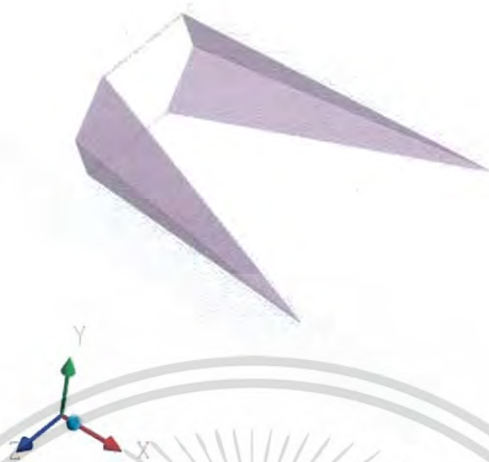
รูปที่ 5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมทรงกลมกลับทิศที่มีมุมปะทะต่างๆ (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน



รูปที่ 5.30 สมรรถนะเชิงความร้อนของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมทรงกลมกลับทิศที่มีมุมปะทะต่างๆ

จากผลการเปรียบเทียบข้างต้นพบว่าที่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมที่มีมุมปะทะเล็กที่สุดที่  $\alpha_2 = 11.5^\circ$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด อันเนื่องมาจากสามารถสร้างการไหลที่ปั่นป่วนซึ่งช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน อีกทั้งยังลดค่าตัวประกอบเสียดทานได้มากกว่าแบบปรับปรุง 1 และมุมปะทะขนาดอื่นๆ ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าที่มากที่สุด ดังนั้นในการศึกษาการปรับปรุงแหวนทรงกรวยเป็นทรงกลมกลับทิศจะยึดการปรับปรุงให้ได้มุมปะทะเล็กที่สุดที่  $\alpha_2 = 11.5^\circ$  เป็นสำคัญ โดยแสดงตัวอย่างของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมได้ดังรูปที่ 5.31

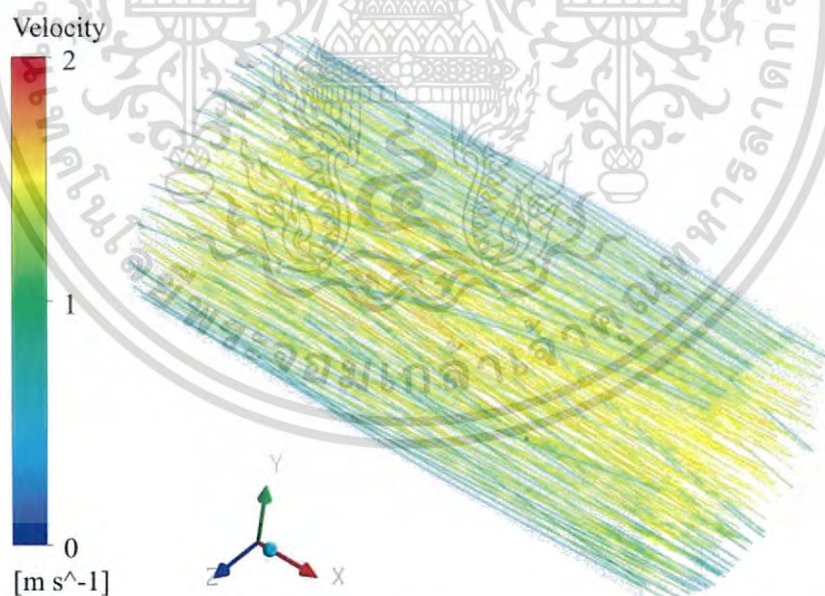
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3

#### 5.4.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ่มกลับทิศ)

เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 จะแสดงในรูปแบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลภายในท่อกลมผิวเรียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.32

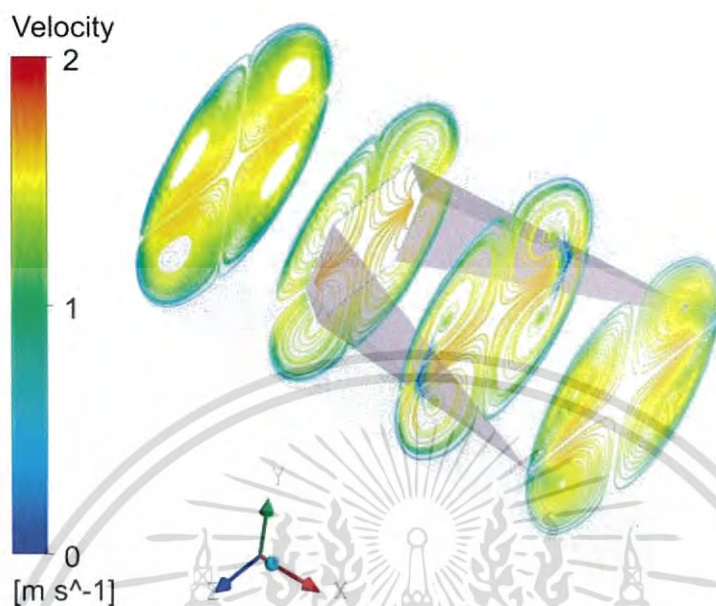


รูปที่ 5.32 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 2 โดยการทำมุมเป็นทรงลิ่มกลับทิศ ( $\alpha_2 = 11.5^\circ$ ) ภายในท่อกลม สามารถทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น สังเกตได้จากลักษณะการไหลเกิดการหมุนวนที่ด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวยมีมากกว่าแบบดั้งเดิม หากมอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

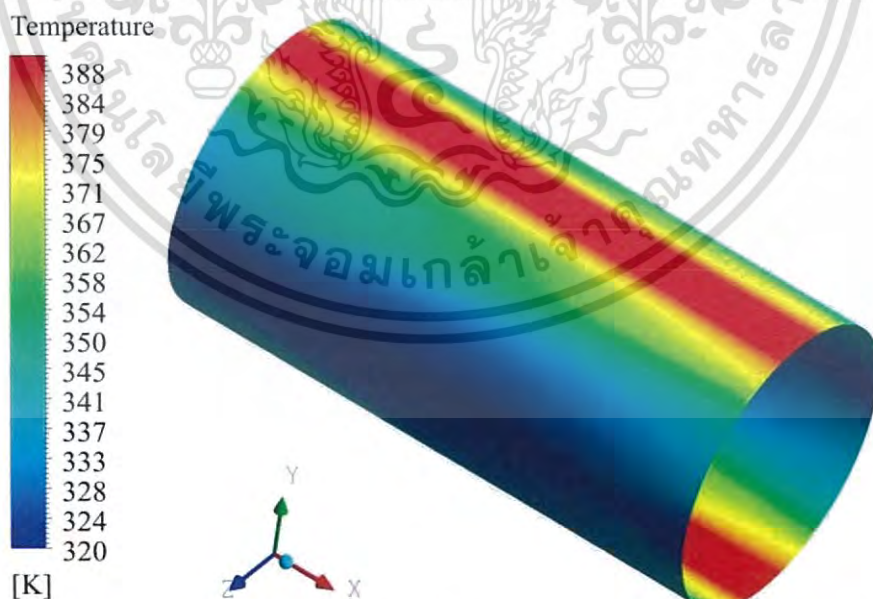
ภาพในแนวระนาบจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นว่ามีกระแสการไหลหมุนวน 2 คู่ ที่ช่วยเหนี่ยวนำกระแสการไหลให้รุนแรงและกระแทกเข้ากับผิวท่อกลมดังแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.33



รูปที่ 5.33 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3

#### 5.4.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงสี่มกลีบทิศ)

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 หรือการสร้างทรงสี่มกลีบทิศที่อยู่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.34



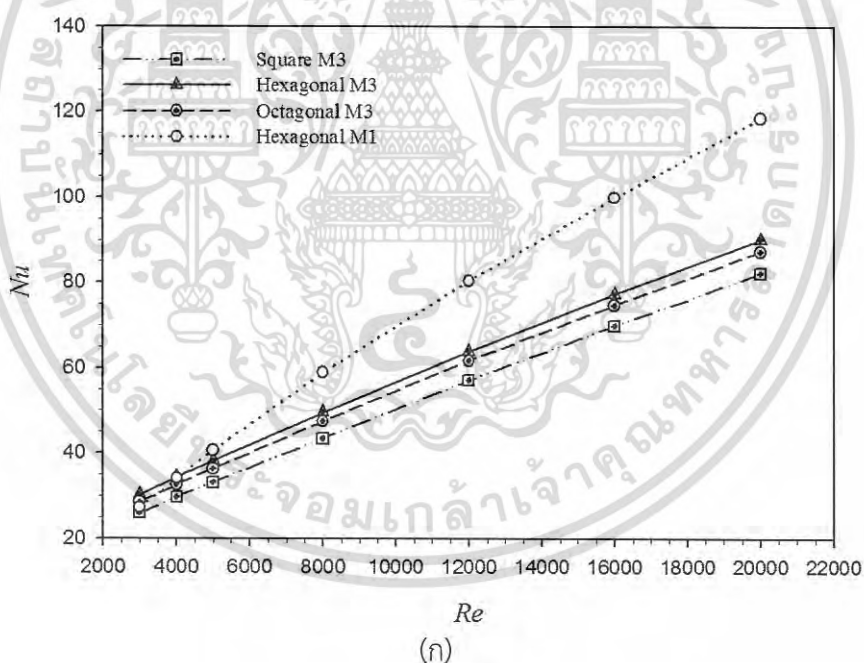
รูปที่ 5.34 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3

จากรูปที่ 5.34 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม  $D_{Ri} = 0.6$ ,  $D_{Ro} = 0.97$ , aspect ratio = 0.67,  $P_R = 2.0$ ,  $\alpha_2 = 11.5^\circ$  และ  $Re = 3,000$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

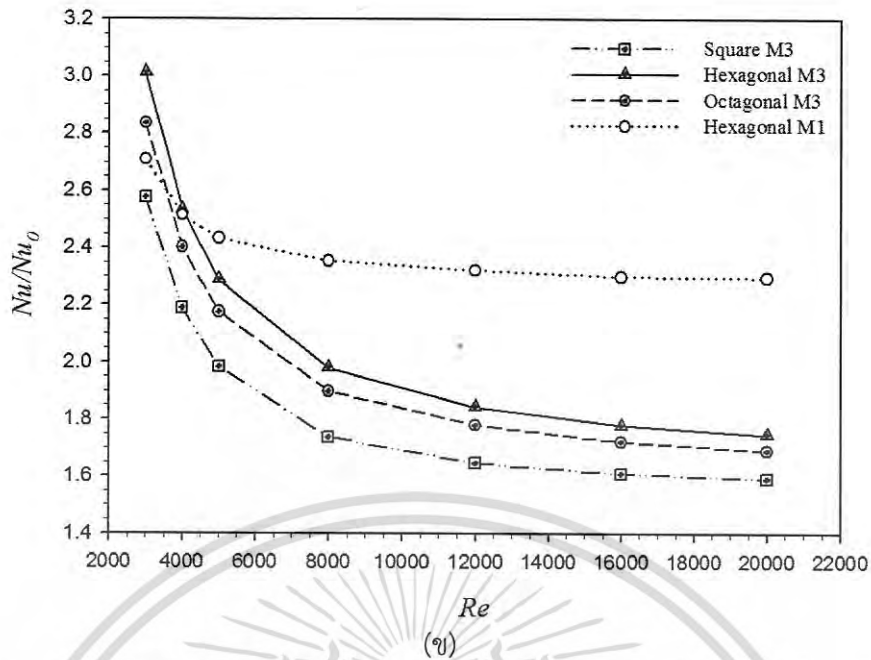
เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 หรือแบบทำมุมปะทะที่ด้านหลังของแหวนทรงกรวยเป็นทรงสี่เหลี่ยมทึบภายในท่อกลม สามารถช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากคอนทัวร์สีเขียวและสีฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนเป็นผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกับความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูง และบริเวณที่เกิดความปั่นป่วนหรือการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิที่บริเวณผนังท่อน้อยที่สุดคือบริเวณกึ่งกลางท่อด้านบนและล่างของแหวนทรงกรวยซึ่งเห็นได้จากคอนทัวร์แดงยาวตลอดแนวการไหล แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่กึ่งกลางของท่อด้านบนและล่างยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อย จึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

#### 5.4.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงสี่เหลี่ยมทึบ)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลล์ต์ ( $Nu$ ) และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81$ ,  $0.97$ ,  $\alpha_r = 0.67$ ,  $P_R = 2.0$ ,  $\alpha_2 = 11.5^\circ$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 3,000$  ถึง  $20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

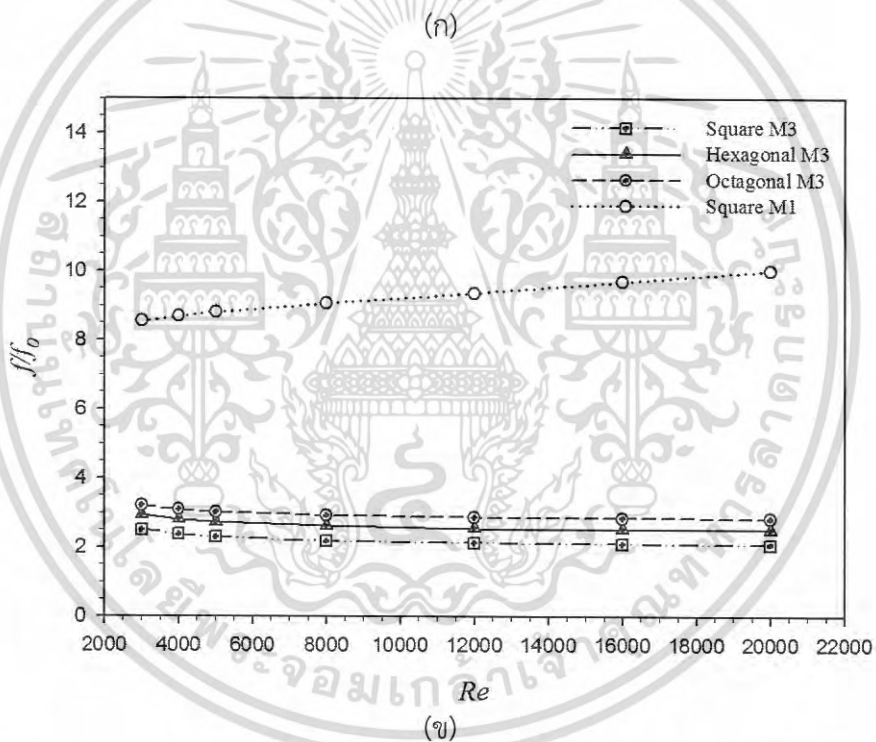
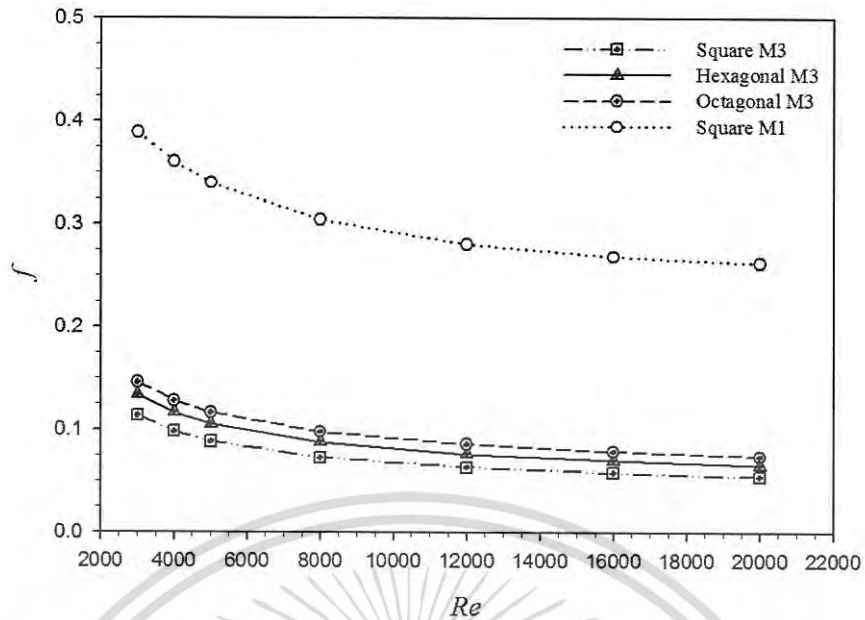


รูปที่ 5.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 (ก)ค่าเลขนัสเซลท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 30.24-90.17 ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 3.01-1.75 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมเช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือแหวนทรงกรวยแปดเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมตามลำดับ โดยค่าที่ได้น้อยกว่าค่าจากแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมที่มีค่ามากที่สุดจากแบบปรับปรุง 1

#### 5.4.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงกลมกลับทิศ)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81, 0.97$ , aspect ratio = 0.67,  $P_R = 2.0$ ,  $\alpha_2 = 11.5$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส์  $Re = 3,000$  ถึง 20,000 แสดงได้ดังรูปที่ 5.36



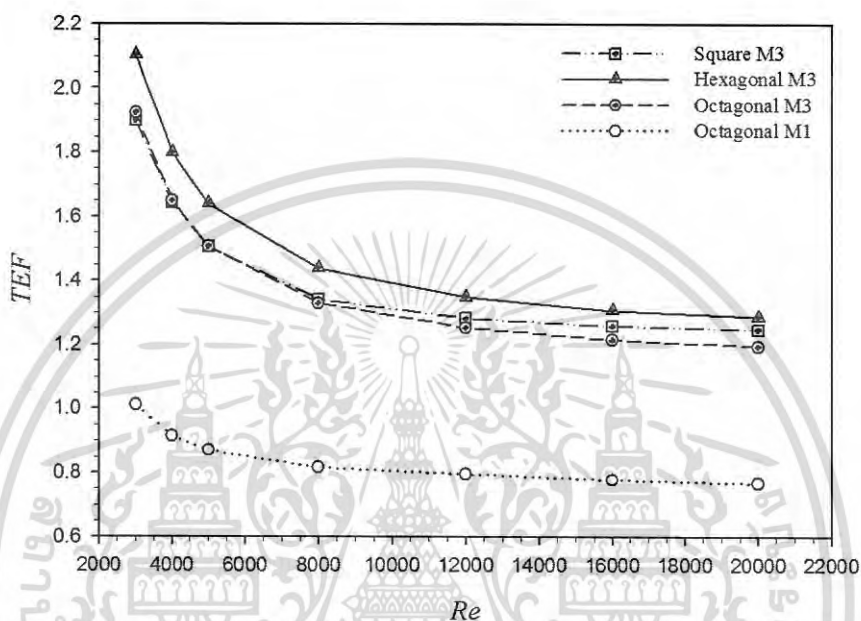
รูปที่ 5.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.11-0.05 ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 2.49-2.07 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม เช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมตามลำดับ โดยค่าที่ได้น้อยกว่าค่าจากแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมที่มีค่าน้อยที่สุดจากแบบปรับปรุง 1 อย่างเห็นได้ชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4.6 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงสี่เหลี่ยมกลับทิศ)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ( $TEF$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81$  0.97, aspect ratio = 0.67,  $P_R = 2.0$ ,  $\alpha_2 = 11.5^\circ$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส์  $Re = 3,000$  ถึง 20,000 แสดงได้ดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 2.12-1.29 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000$ -20,000 ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมและแปดเหลี่ยม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.90-1.25 เท่า และ 1.92-1.20 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ตามลำดับ

จากการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 3 โดยการทำมุมปะทะที่ด้านหลังของแหวนทรงกรวยแบบทรงสี่เหลี่ยมกลับทิศ ทำให้ลดพื้นที่ของกรวยที่ขวางการไหลให้มีขนาดเล็กลงได้มากกว่าแบบทรงกรวยดั้งเดิมและแบบปรับปรุงแบบที่ 1 ส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลง และเมื่อเทียบกับแบบปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงสี่เหลี่ยม) แล้วนั้น การปรับปรุงรูปแบบที่ 3 สำหรับแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมให้ผลสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีกว่าแบบที่ 2 แต่ในแหวนทรงสี่เหลี่ยมกลับทิศได้ผลที่น้อยลง จึงสรุปได้ว่า การทำมุมปะทะที่ตัวแหวนกรวยไม่ว่าจะเป็นทรงสี่เหลี่ยมด้านหน้าหรือกลับทิศสามารถลดค่าตัวประกอบเสียดทานลงได้ แต่ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าหากทำมุมให้อยู่ด้านใดด้านหนึ่งแล้วจะให้ผลที่ดีที่สุด (ทรงสี่เหลี่ยมได้ผลดีที่สุดคือสี่เหลี่ยม, ทรงหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมได้ผลดีที่สุดคือสี่เหลี่ยมกลับทิศ) ดังนั้นหากทำมุมที่ตัวแหวนกรวยเป็นทรงสี่เหลี่ยมที่ด้านหน้าและกลับทิศอาจจะให้ผลที่ดีเนื่องจากมีการลดพื้นที่ขวางการไหลทั้งสองด้าน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4

### 5.5.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชรที่ระยะตัด $0.25D$ , $0.5D$ , $0.75D$ )

จากการศึกษาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงที่ผ่านมาทั้ง 3 รูปแบบ ทำให้ทราบว่า การปรับปรุงแหวนทรงกรวยนั้นจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงทั้งจากทรงลิ้มและลิ้มกลับทิศโดยขึ้นอยู่กับรูปทรงของแหวนทรงกรวยนั้นๆ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาการปรับปรุงแหวนทรงกรวยเพิ่มเติม โดยการปรับปรุงลิ้มที่ด้านทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวย หรือก็คือทรงเพชรนั่นเอง ซึ่งคาดหวังว่าการทำมุมปะทะที่แหวนทรงกรวยทั้งทางเข้าและทางออกเป็นรูปทรงเพชรจะช่วยลดค่าความดันตกคร่อมได้มากขึ้น ตัวอย่างลักษณะการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 4 แสดงไว้ดังรูปที่ 5.38-5.40

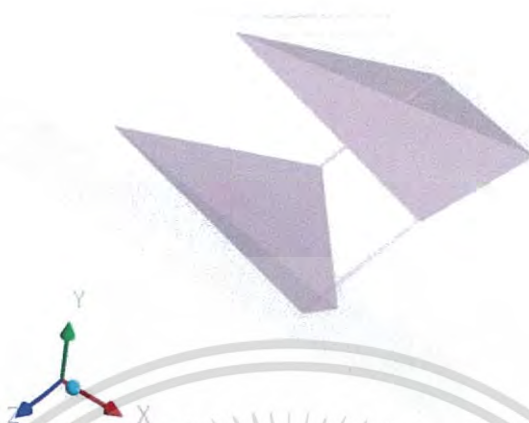


รูปที่ 5.38 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด =  $0.25D$ )



รูปที่ 5.39 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด =  $0.5D$ )

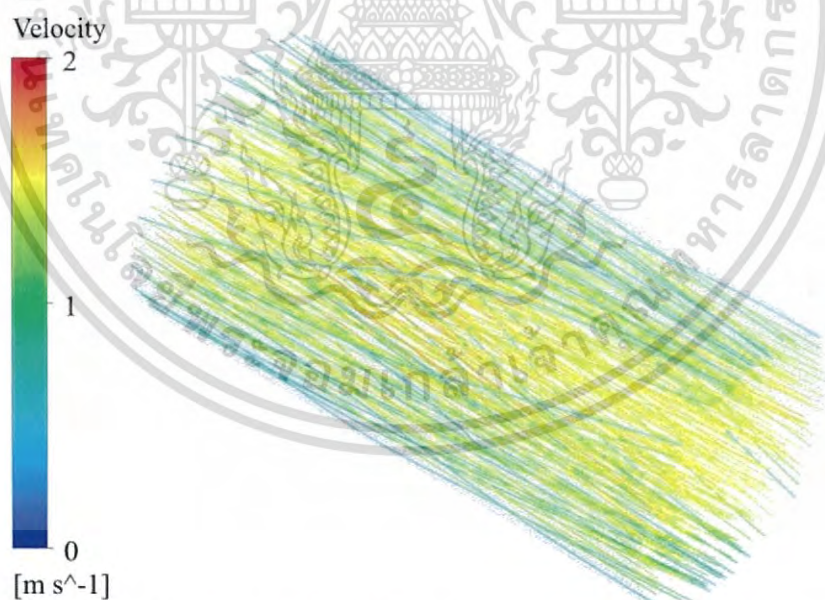
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



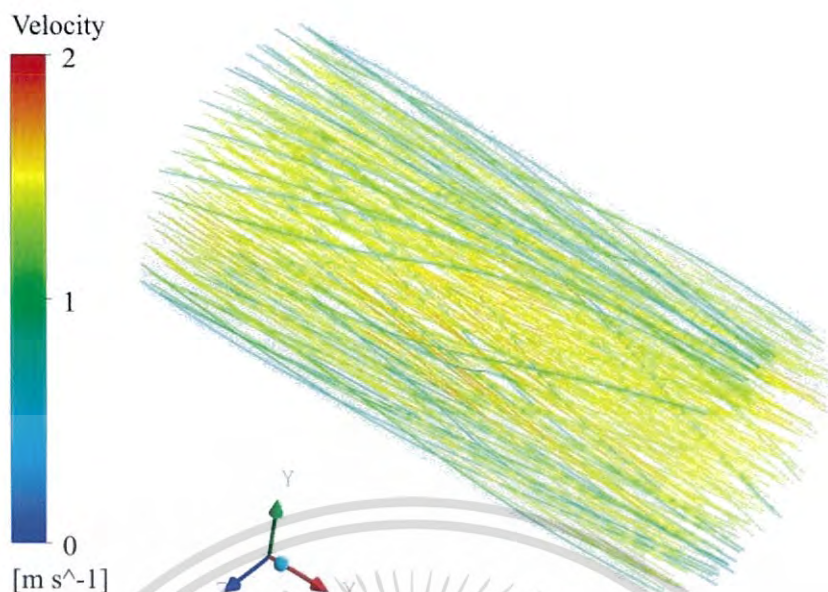
รูปที่ 5.40 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด =  $0.75D$ )

5.5.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชรที่ระยะตัด  $0.25D$ ,  $0.5D$ ,  $0.75D$ )

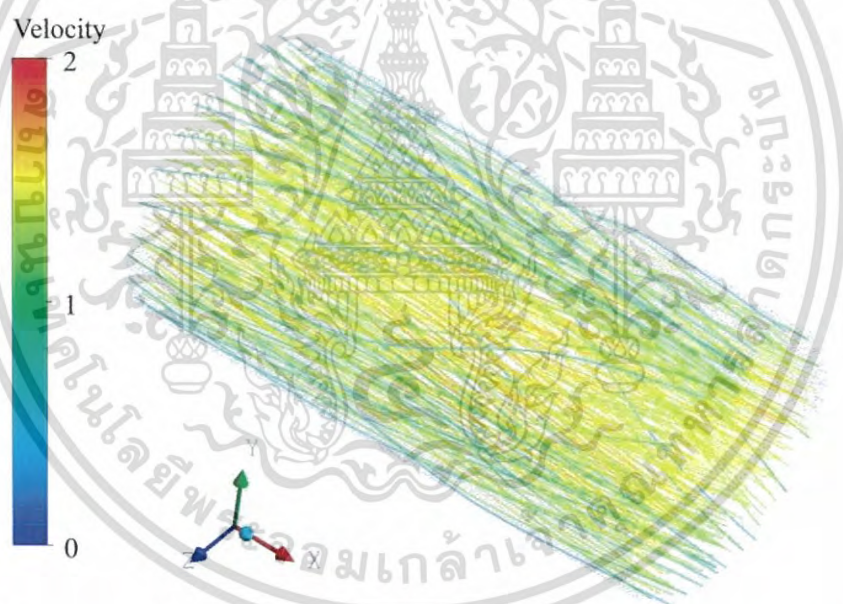
เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ ที่ระยะมุมตัดมาบรรจบกันที่  $0.25D$ ,  $0.5D$  และ  $0.75D$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.41-5.43 ตามลำดับ



รูปที่ 5.41 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนกรวยทรงหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด =  $0.25D$ )

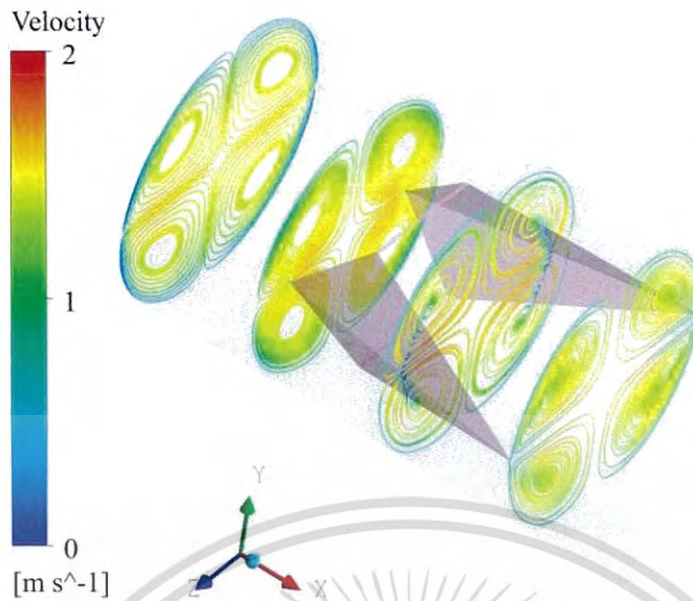


รูปที่ 5.42 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนกรวยทรงหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด =  $0.5D$ )

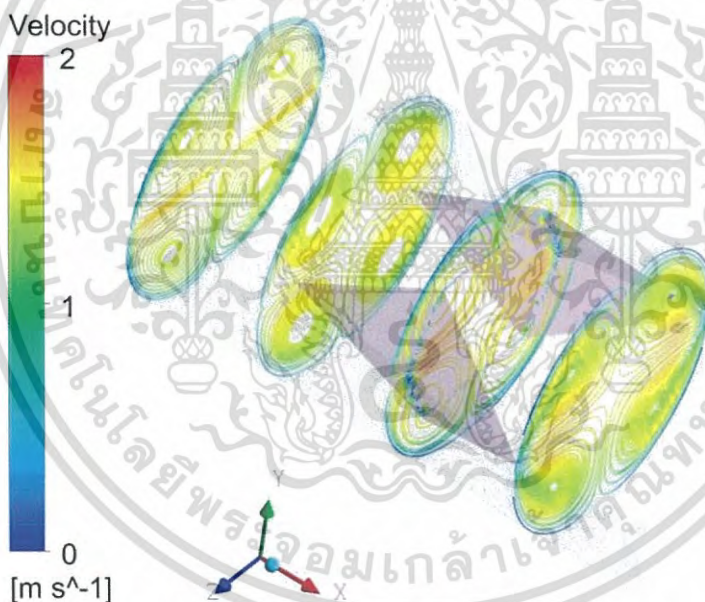


รูปที่ 5.43 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนกรวยทรงหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด =  $0.75D$ )

ในรูปที่ 5.44-5.46 แสดงเส้นกระแสการไหลในแนวระนาบที่ระยะมุมตัดมาบรรจบกันที่  $0.25D$ ,  $0.5D$  และ  $0.75D$  ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 4 ทำให้เกิดกระแสการไหลหมุนวน 2 คู่ ที่ช่วยเหนี่ยวนำกระแสการไหลให้รุนแรงและกระแทกเข้ากับผิวท่อกลม ซึ่งช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหลเกิดการไหลหมุนวนมากขึ้นเมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิม

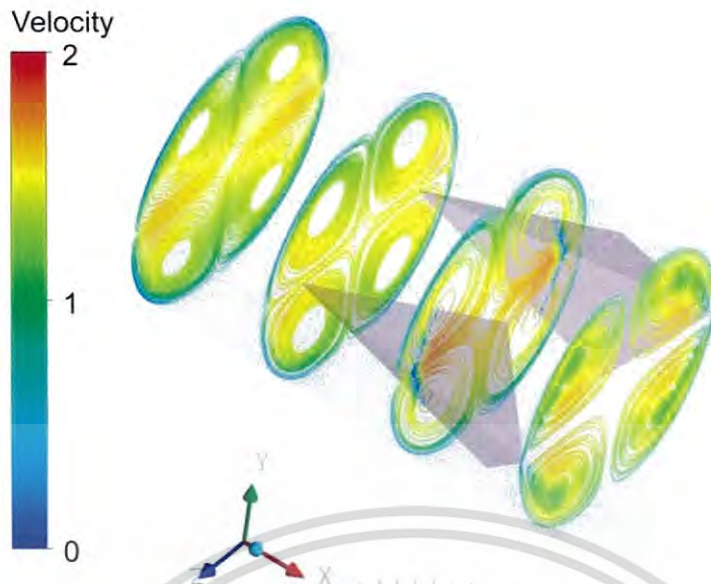


รูปที่ 5.44 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด =  $0.25D$ )



รูปที่ 5.45 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด =  $0.5D$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

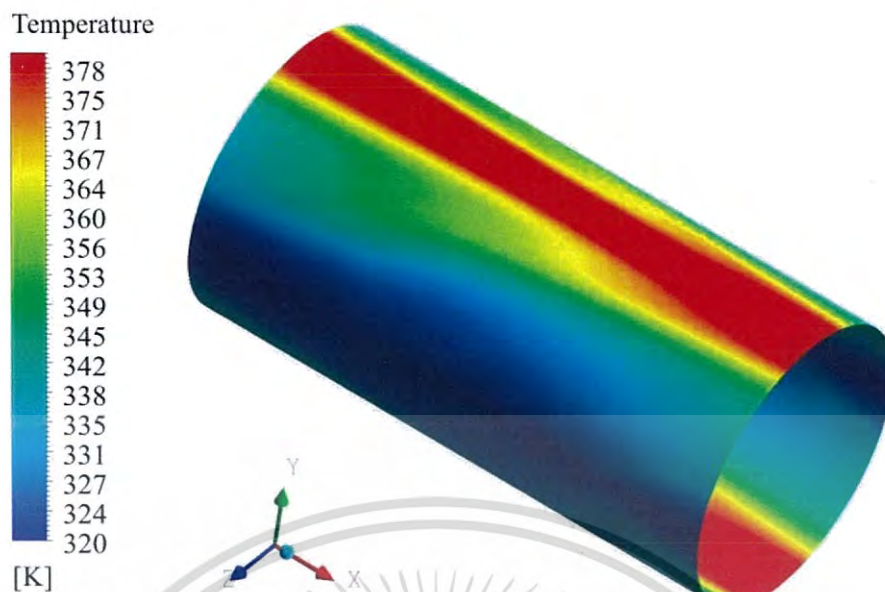


รูปที่ 5.46 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด =  $0.75D$ )

เมื่อเปรียบเทียบกับกรใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม พบว่าการใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงโดยทำทรงลิ้มที่ด้านทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวยหรือทรงเพชร โดยมุมปะทะของด้านทางเข้าและทางออกเข้ามาบรรจบใกล้เคียงกันที่ระยะ  $0.25D$ ,  $0.5D$  และ  $0.75D$  เมื่อ  $D$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อกลม พบว่าทำให้เกิดการไหลหมุนวนมากกว่าแบบดั้งเดิม ซึ่งการไหลหมุนวนนี้เองที่เกิดจากการทำมุมปะทะเป็นลิ้มที่ทางเข้าและทางออก ซึ่งช่วยเหนี่ยวนำกระแสการไหลให้รุนแรงขึ้นจนนำไปสู่การถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นของระบบ

### 5.5.3 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชรที่ระยะตัด $0.25D$ , $0.5D$ , $0.75D$ )

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4 หรือการทำทรงลิ้มที่ด้านทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวยที่ระยะ  $0.25D$ ,  $0.5D$ ,  $0.75D$  ที่ติดตั้งภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ จะแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.47-5.49

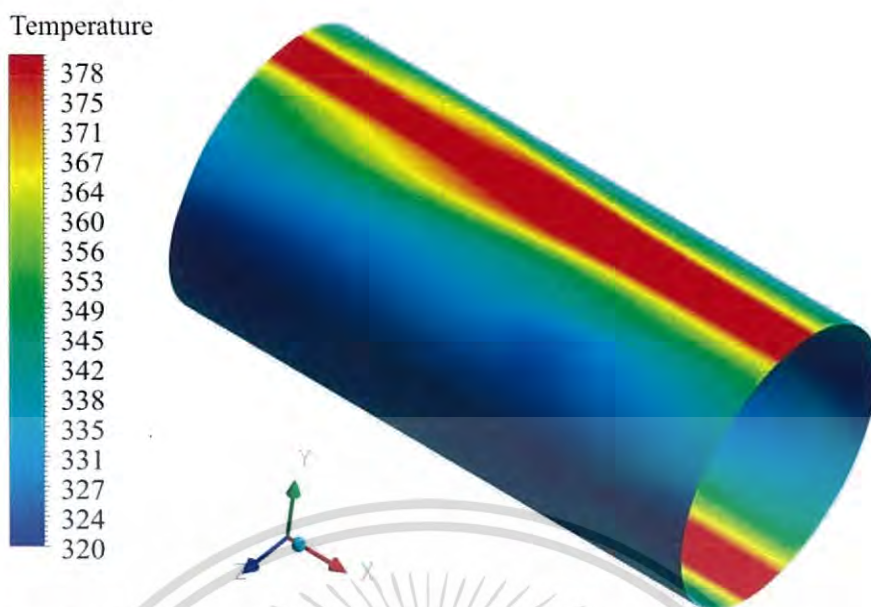


รูปที่ 5.47 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด =  $0.25D$ )



รูปที่ 5.48 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด =  $0.5D$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

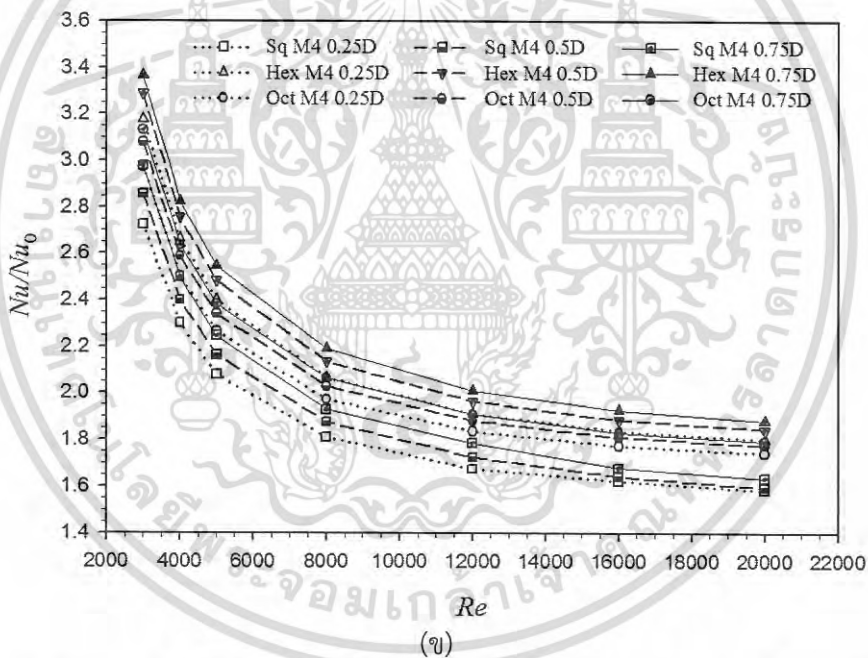
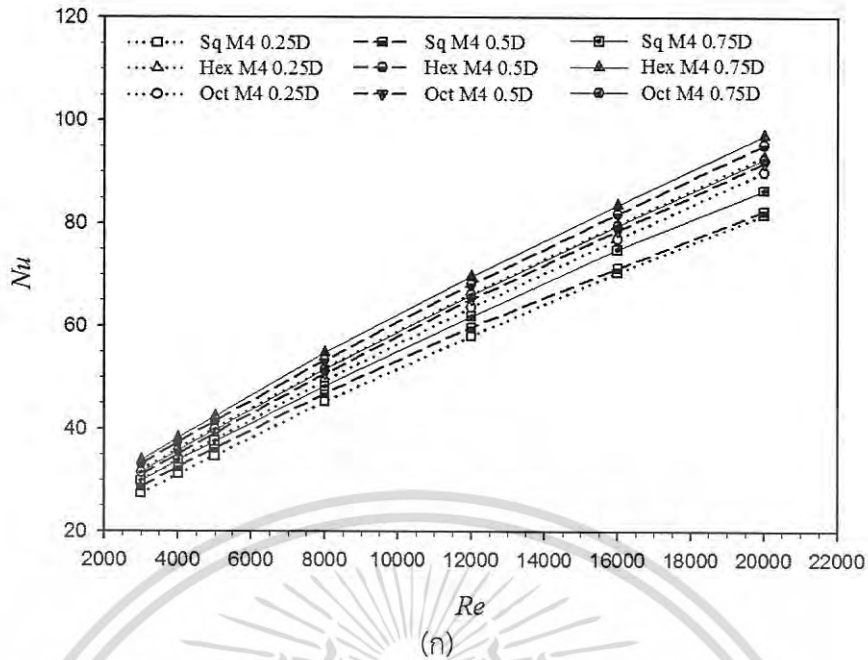


รูปที่ 5.49 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ที่ระยะตัด =  $0.75D$ )

จากรูปที่ 5.47-5.49 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.97$ , aspect ratio = 0.67,  $P_R = 2.0$  และ  $Re = 3,000$  เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4 ที่ระยะการตัด  $0.25D$ ,  $0.5D$  และ  $0.75D$  ช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้นหรือมีการกระจายอุณหภูมิมากกว่าแบบทรงกรวยดั้งเดิม สังเกตได้จากคอนทัวร์สีเขียวและสีฟ้าที่เกิดขึ้น และเห็นได้จากคอนทัวร์แดงของผิวท่อที่ลดน้อยลง แต่ก็แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เกิดคอนทัวร์สีแดงยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสไหลน้อยจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

#### 5.5.4 อัตราส่วนเลขนัสเซลท์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชรที่ระยะตัด $0.25D$ , $0.5D$ , $0.75D$ )

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลท์ ( $Nu$ ) และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4 เมื่อใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณามุมปะทะที่ระยะ  $0.25D$ ,  $0.5D$  และ  $0.75D$  ที่สภาวะตัวแปร  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81$ ,  $0.97$ , aspect ratio = 0.67,  $P_R = 2.0$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส์  $Re = 3,000-20,000$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.50



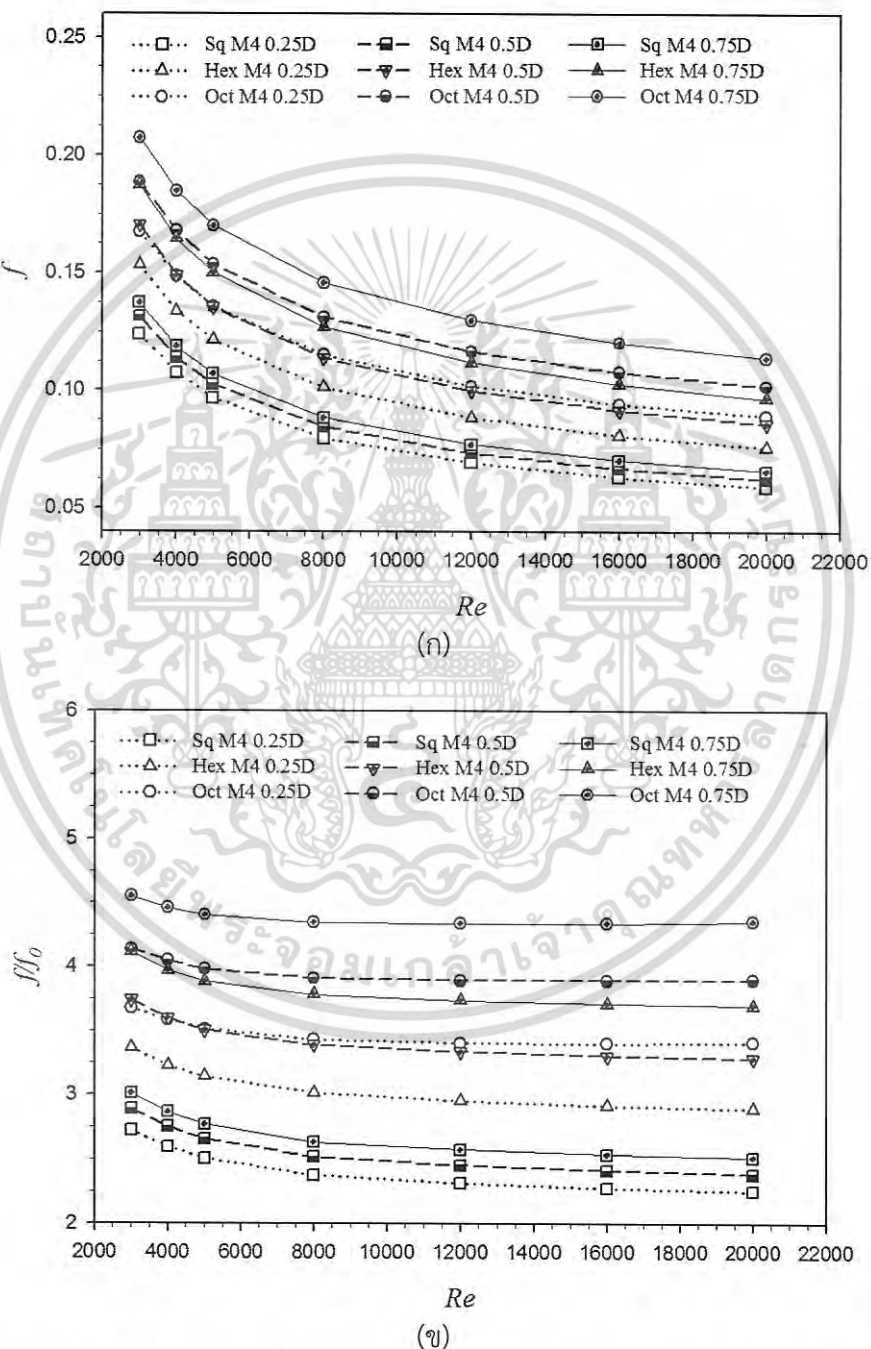
รูปที่ 5.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4 (ก)ค่าเลขนัสเซลท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 33.76-97.19 ที่ระยะตัด 0.75D ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง 3.36-1.88 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ระยะตัด 0.75D ในช่วงของ  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมเช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือค่าจากแหวนทรงกรวยแปดเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมตามลำดับ ที่ระยะตัด 0.75D เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.5.5 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชรที่ระยะตัด 0.25D, 0.5D, 0.75D)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) เมื่อใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชร) ที่สภาวะ  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81$ ,  $0.97$ , aspect ratio = 0.67,  $P_R = 2.0$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 3,000$  ถึง  $20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.51



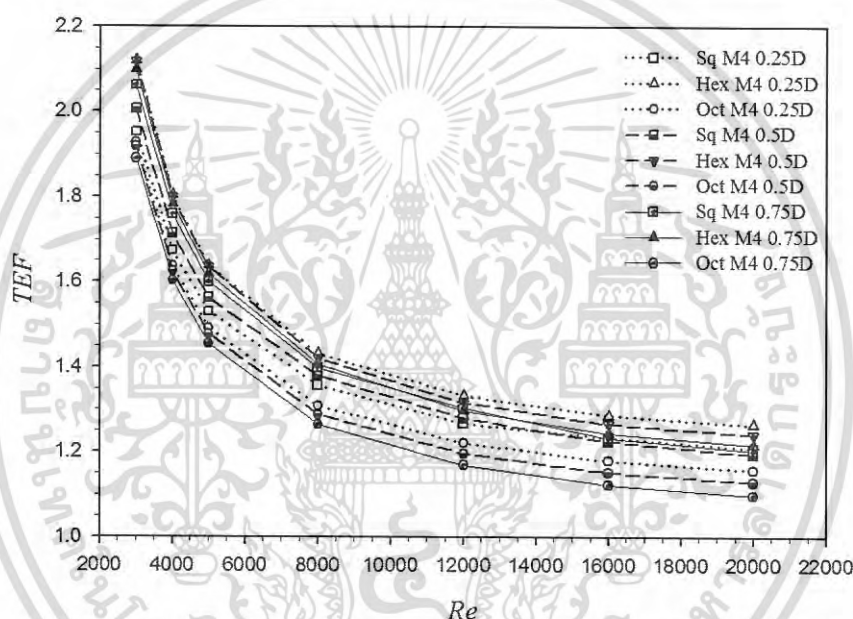
รูปที่ 5.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4 (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 0.12-0.06 ที่ระยะตัด 0.25D ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 2.72-2.25 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่ระยะตัด 0.25D ในช่วงของ  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม เช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือค่าจากแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมตามลำดับ

#### 5.5.6 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชรที่ระยะตัด 0.25D, 0.5D, 0.75D)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4 ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i} = 0.6$ ,  $D_{R,o} = 0.81$ ,  $0.97$ , aspect ratio = 0.67,  $P_R = 2.0$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 3,000$  ถึง  $20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.52



รูปที่ 5.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 4

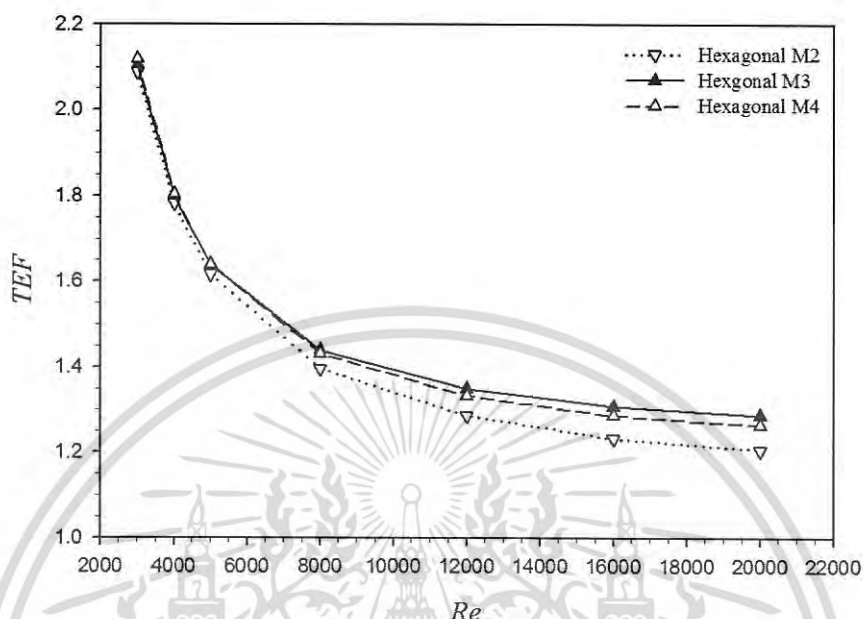
จากกราฟพบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 2.12-1.26 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re = 3,000-20,000$  ในแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมที่ระยะตัด 0.25D ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือค่าจากแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมและแปดเหลี่ยม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.06-1.16 เท่า และ 1.93-1.16 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ตามลำดับ

จากการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 4 โดยการทำมุมปะทะที่ด้านหน้าและด้านหลังของแหวนทรงกรวยหรือทรงเพชรที่ระยะการตัดมาบรรจบกันที่ 0.25D, 0.5D และ 0.75D เมื่อ  $D$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อกลม เห็นได้ว่าจะสามารถลดพื้นที่ของแหวนทรงกรวยที่ขวางการไหลให้มีขนาดเล็กลงได้มากกว่าแบบทรงกรวยดั้งเดิมและแบบปรับปรุงแบบที่ 1 ส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลง และเมื่อนำค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดของแบบปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชร) เปรียบเทียบกับแบบปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงลิ้ม) และแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ้มกลับทิศ) ดังรูป 5.53 พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นับผูกพันในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงลิ่มกลับทิศ) ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงกว่าแบบปรับปรุงแบบอื่นๆ ดังนั้นผู้วิจัยจะยึดรูปแบบการปรับปรุงแบบที่ 3 เป็นรูปแบบหลักในการวิจัยถึงตัวแปรอื่นๆ ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

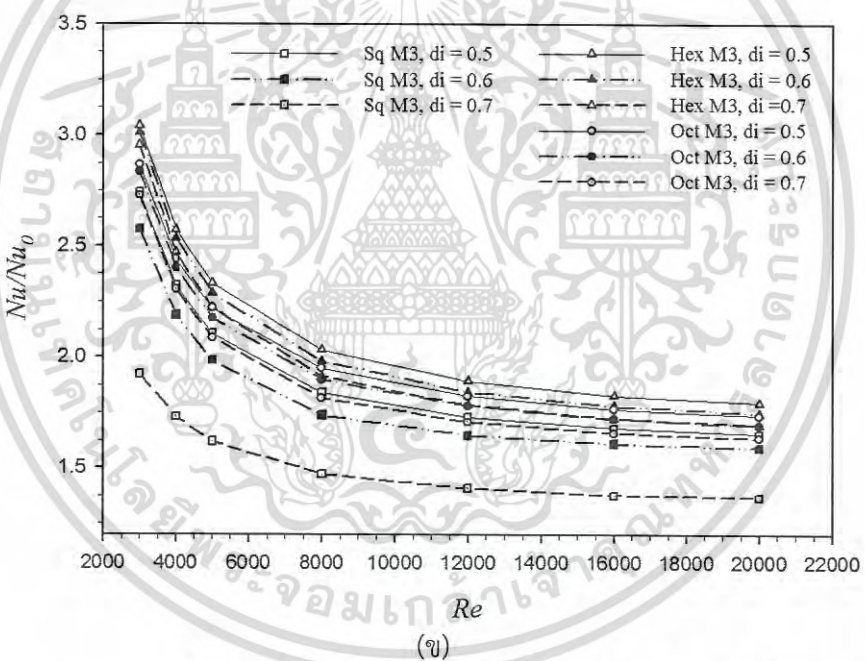
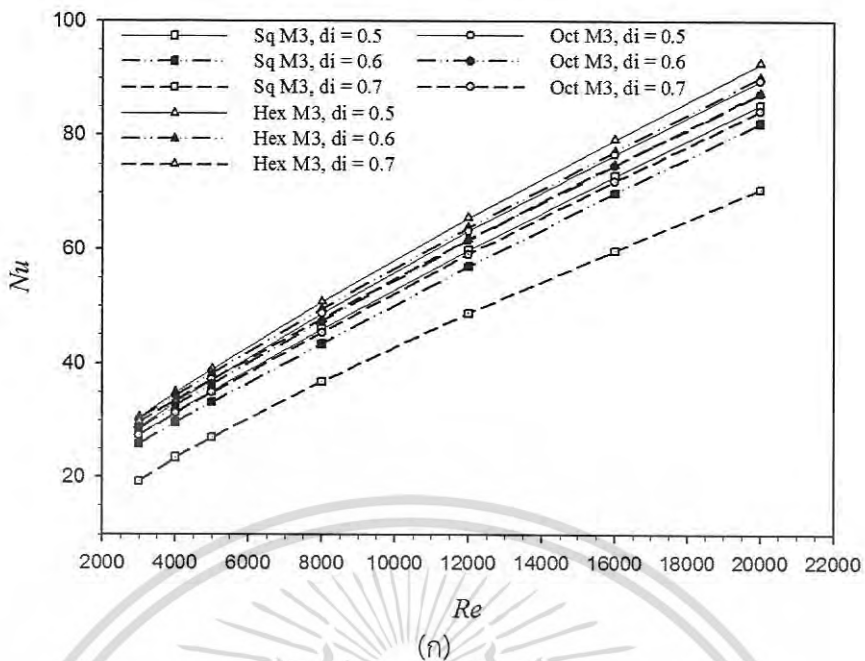


รูปที่ 5.53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2, 3 และ 4

## 5.6 อิทธิพลจากอัตราส่วนความกว้างทางเข้าของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม โดยการทำมุมปะทะให้มีขนาดเล็กลงมีผลทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์รูปทรงของแหวนทรงกรวยที่ทำการปรับปรุงพบว่ารูปทรงแหวนทรงกรวยแบบทรงลิ่มกลับทิศของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรวยปรับปรุงแหวนทรงกรวยในแบบอื่นๆ เนื่องจากยังมีปัจจัยของตัวแปรต่างๆ ที่คาดว่าจะมีผลต่อสมรรถนะเชิงความร้อนอยู่ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาแหวนทรงกรวยแบบลิ่มกลับทิศต่อไป โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความกว้างด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวย โดยศึกษาที่  $D_{R,i} = 0.5, 0.6$  และ  $0.7$  และสำหรับทางออกยังคงความกว้างคงเดิมไว้ที่  $D_{R,o} = 0.81$  สำหรับแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และ  $D_{R,o} = 0.97$  สำหรับแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยม

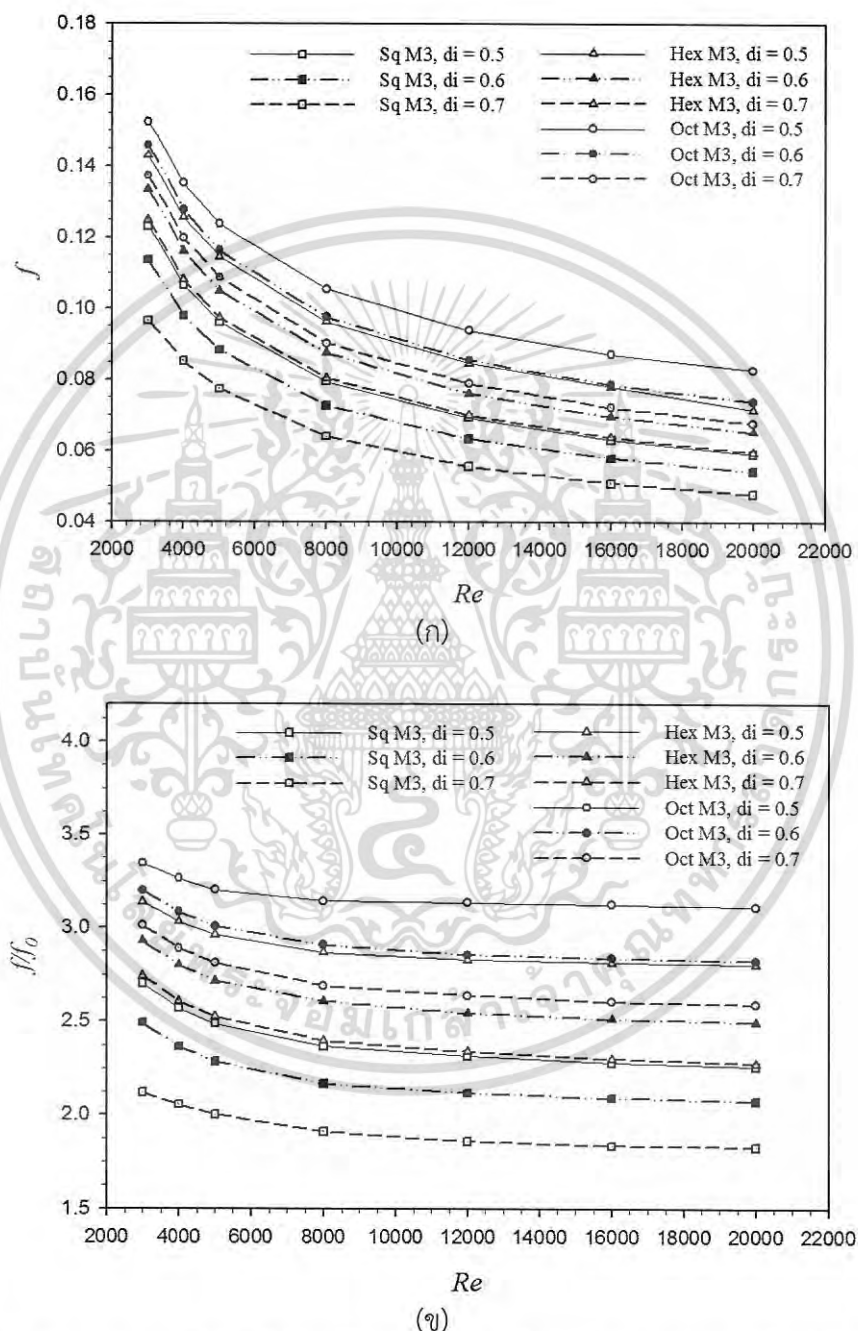
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลท์ ( $Nu$ ) และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 เมื่อใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความกว้างทางเข้าเท่ากับ  $0.5, 0.6$  และ  $0.7$  ที่สภาวะตัวแปร  $D_{R,o} = 0.81$  และ  $0.97$ , aspect ratio =  $0.67$ ,  $P_R = 2.0$ ,  $\alpha_2 = 11.5^\circ$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 3,000-20,000$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.54



รูปที่ 5.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่  $D_{R,i} = 0.5, 0.6$  และ  $0.7$  (ก)ค่าเลขนัสเซิลท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์

จากรูปที่ 5.54 แสดงให้เห็นกราฟค่าเลขนัสเซิลท์และอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่  $D_{R,i} = 0.5, 0.6$  และ  $0.7$  เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซิลท์สูงสุดอยู่ในช่วง  $30.53-92.66$  ที่  $D_{R,i} = 0.5$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม และอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์สูงสุดอยู่ในช่วง  $3.04-1.79$  เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $D_{R,i} = 0.5$  ในช่วงของ  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมเช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือค่าจากแหวนทรงกรวยแปดเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมตามลำดับ และผลของความกว้างที่ให้ผลลัพธ์เรียงจากมากไปน้อยคือ  $D_{R,i} = 0.5, 0.6$  และ  $0.7$  ตามลำดับ

ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 เมื่อใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความกว้างทางเข้าเท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 ที่สถานะตัวแปร  $D_{R,i} = 0.81$  และ 0.97, aspect ratio = 0.67,  $P_R = 2.0$ ,  $\alpha_2 = 11.5^\circ$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 3,000-20,000$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.55

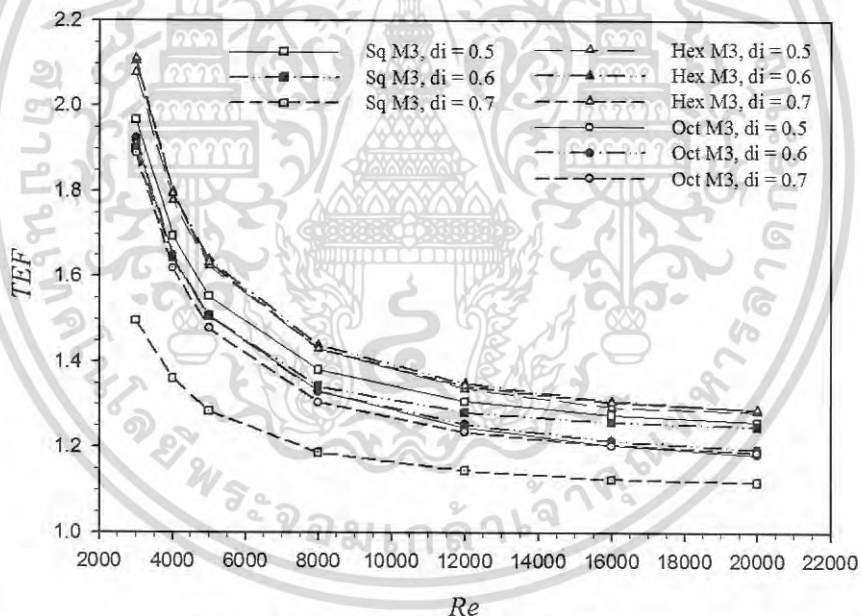


รูปที่ 5.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่  $D_{R,i} = 0.5, 0.6$  และ 0.7 (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

จากรูปที่ 5.55 แสดงให้เห็นค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน เอกสารเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่  $D_{R,i} = 0.5, 0.6$  และ 0.7 เมื่อวิเคราะห์ผลที่ได้พบว่าการเพิ่มค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $D_{R,i}$  ทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลง โดยค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.10-0.05 ที่  $D_{R,i} = 0.7$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 2.12-1.83 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $D_{R,i} = 0.7$  ในช่วงของ  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้สูงขึ้นเป็นลำดับถัดมาคือค่าจากแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมตามลำดับ และผลของความกว้างที่ให้ผลลัพธ์เรียงจากมากไปน้อยคือ  $D_{R,i} = 0.5, 0.6$  และ  $0.7$  ตามลำดับ

จากผลการศึกษาจึงสามารถสรุปได้ว่าค่า  $D_{R,i}$  มีผลกับค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์และค่าส่วนตัวประกอบเสียดทาน โดยเมื่อ  $D_{R,i}$  เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์และค่าอัตราส่วนประกอบเสียดทานลดต่ำลง แต่เมื่อ  $D_{R,i}$  ลดลง จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์และค่าอัตราส่วนประกอบเสียดทานสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของ  $D_{R,i}$  ที่ให้ผลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ดังรูปที่ 5.56 พบว่าที่  $D_{R,i} = 0.6$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมนั้นให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดในช่วง 2.12-1.29 ที่  $Re = 3,000-20,000$  ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงที่สุดจากการค่าของ  $D_{R,i}$  ทั้งหมด ดังนั้น ในการศึกษาถึงตัวแปรอื่นในหัวข้อถัดไปจะกำหนดอัตราส่วนความกว้างอยู่ที่  $D_{R,i} = 0.6$  ทุกกรณี และทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความกว้างทางออกแหวนทรงกรวย  $D_{R,o}$  ในหัวข้อต่อไป



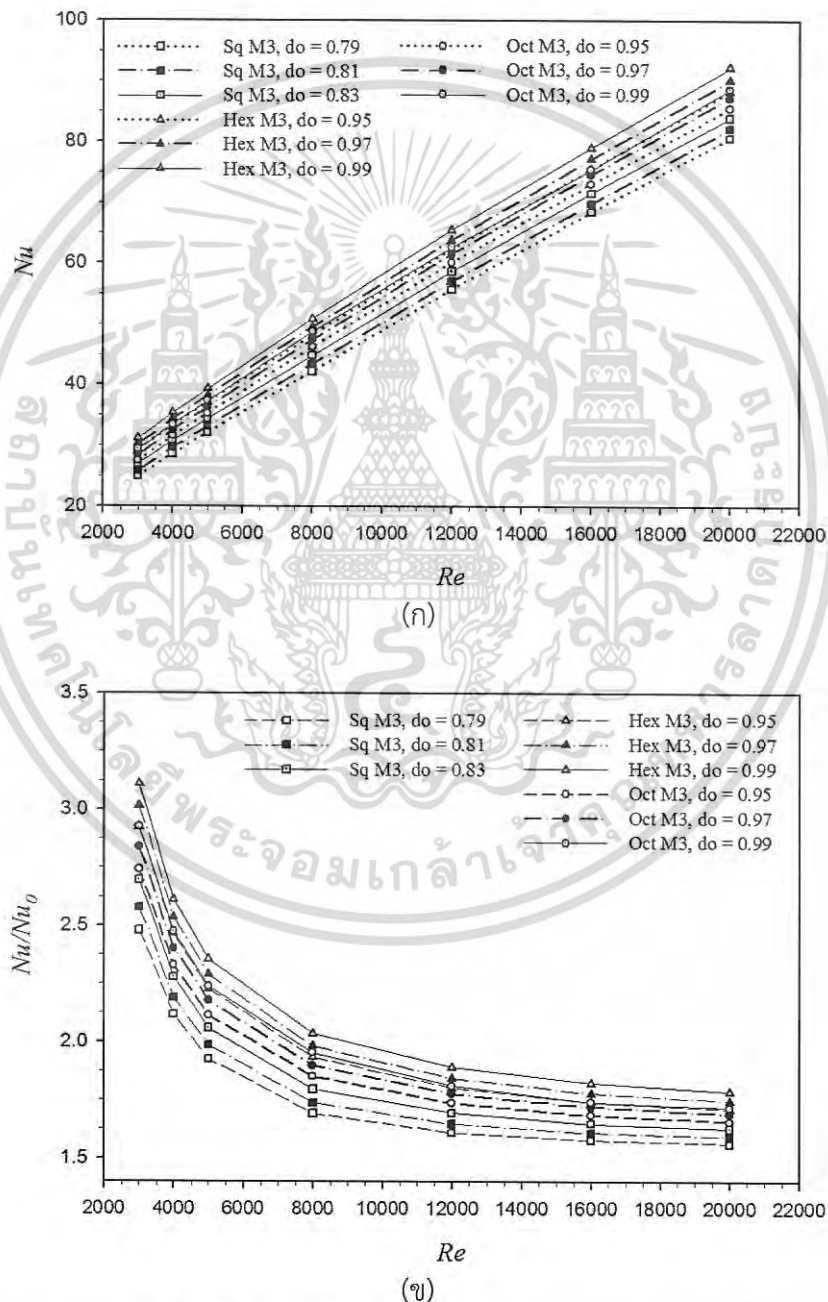
รูปที่ 5.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่  $D_{R,i} = 0.5, 0.6$  และ  $0.7$

## 5.7 อิทธิพลจากความกว้างทางออกของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอิทธิพลอัตราส่วนความกว้างของทางเข้าที่  $D_{R,i} = 0.6$  ให้ผลของสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดในการศึกษาที่ผ่านมา ดังนั้น ในหัวข้อต่อไปนี้จะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนความกว้างด้านทางออกว่ามีผลต่อค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนอย่างไรบ้าง โดยศึกษาที่  $D_{R,o} = 0.79, 0.81$  และ  $0.83$  สำหรับแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และ  $D_{R,o} = 0.95, 0.97$  และ  $0.99$  สำหรับแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแปดเหลี่ยม สำหรับอัตราส่วนทางเข้ากำหนดไว้ที่  $D_{R,i} = 0.6$  เนื่องจากให้ผลดีที่สุดจากการทดลองในหัวข้อก่อนหน้านี้

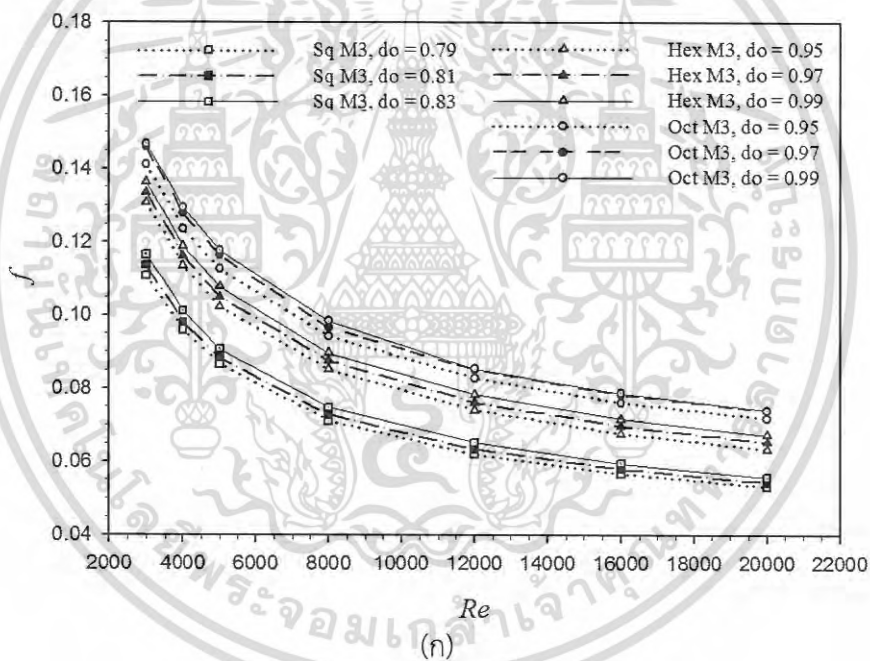
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลล์ท์ ( $Nu$ ) และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความกว้างทางออก  $D_{R,o} = 0.79, 0.81$  และ  $0.83$  สำหรับแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และ  $D_{R,o} = 0.95, 0.97$  และ  $0.99$  สำหรับแหวนทรงกรวยหกและแปดเหลี่ยม ที่สภาวะตัวแปร  $D_{R,i} = 0.6$ , aspect ratio =  $0.67$ ,  $P_R = 2.0$ ,  $\alpha_2 = 11.5^\circ$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 3,000-20,000$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.57



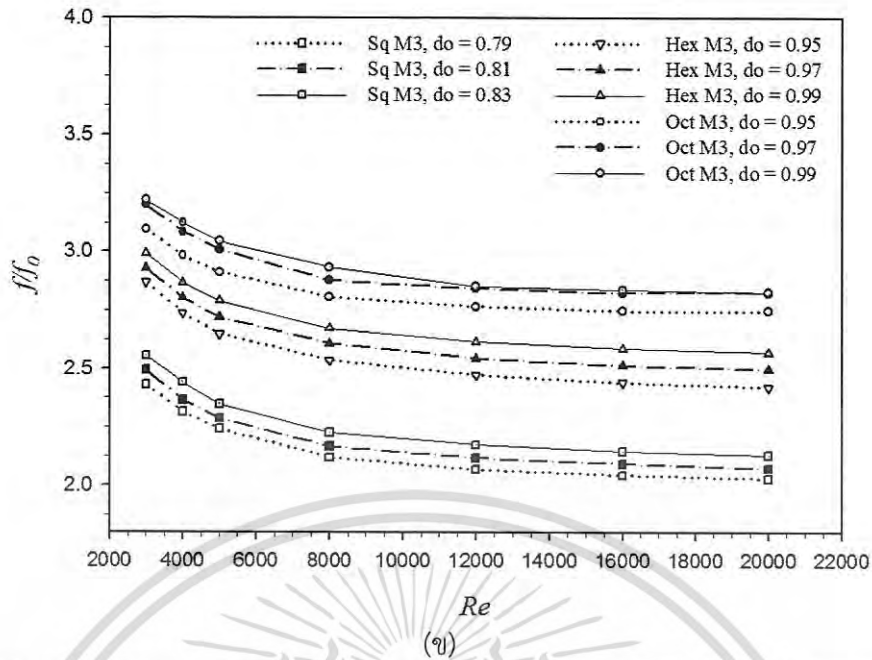
รูปที่ 5.57 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่  $D_{R,o} = (0.79, 0.95), (0.81, 0.97)$  และ  $(0.83, 0.99)$  (ก)ค่าเลขนัสเซลล์ท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.57 แสดงให้เห็นกราฟค่าเลขนัสเซลล์ต์และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่  $D_{R,o} = (0.79, 0.95), (0.81, 0.97)$  และ  $(0.83, 0.99)$  เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลล์ต์สูงสุดอยู่ในช่วง 31.20-92.26 ที่  $D_{R,o} = 0.99$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์สูงสุดอยู่ในช่วง 3.11-1.79 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $D_{R,o} = 0.99$  ในช่วงของ  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมเช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือค่าจากแหวนทรงกรวยแปดเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมตามลำดับ และผลของความกว้างที่ให้ผลลัพธ์เรียงจากน้อยไปมากคือ  $D_{R,o} = (0.79, 0.95), (0.81, 0.97)$  และ  $(0.83, 0.99)$  ตามลำดับ

ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความกว้างทางออก  $D_{R,o} = 0.79, 0.81$  และ  $0.83$  สำหรับแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และ  $D_{R,o} = 0.95, 0.97$  และ  $0.99$  สำหรับแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยม ที่สภาวะตัวแปร  $D_{R,i} = 0.6$ , aspect ratio =  $0.67$ ,  $P_R = 2.0$ ,  $\alpha_2 = 11.5^\circ$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 3,000-20,000$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

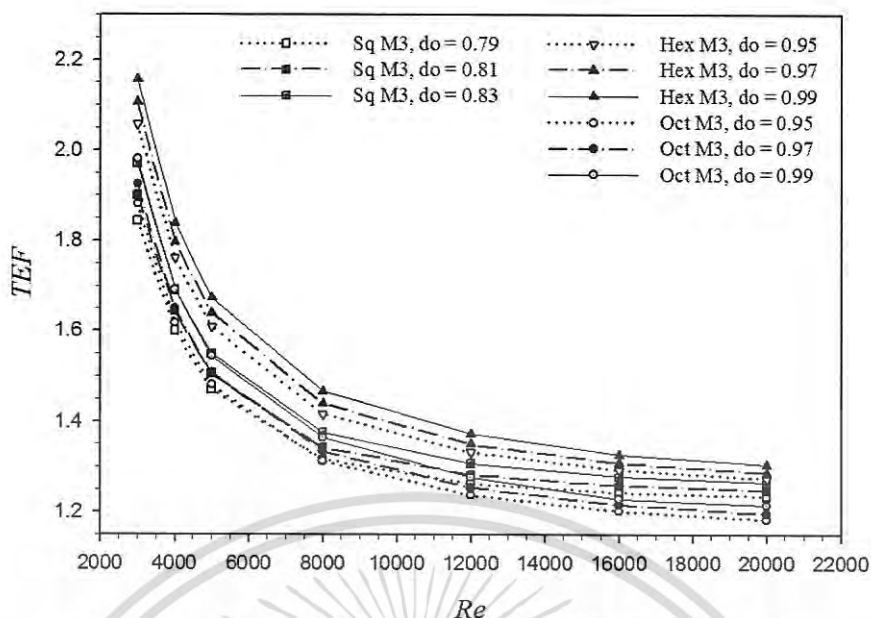


รูปที่ 5.58 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่  $D_{R,o} = (0.79, 0.95)$ ,  $(0.81, 0.97)$  และ  $(0.83, 0.99)$  (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

จากรูปที่ 5.58 แสดงให้เห็นค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่  $D_{R,o} = (0.79, 0.95)$ ,  $(0.81, 0.97)$  และ  $(0.83, 0.99)$  เมื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มค่า  $D_{R,o}$  ทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.11-0.05 ที่  $D_{R,o} = 0.79$  ของแหวนทรงกรวยทรงสี่เหลี่ยม และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 2.43-2.03 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $D_{R,o} = 0.79$  ในช่วงของ  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้สูงขึ้นเป็นลำดับถัดมาคือค่าจากแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมตามลำดับ และผลของความกว้างที่ให้ผลลัพธ์เรียงจากน้อยไปมากคือ  $D_{R,o} = (0.79, 0.95)$ ,  $(0.81, 0.97)$  และ  $(0.83, 0.99)$  ตามลำดับ

จากผลการศึกษาก็สามารถสรุปได้ว่าค่า  $D_{R,o}$  มีผลกับค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และค่าส่วนตัวประกอบเสียดทาน โดยเมื่อ  $D_{R,o}$  เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้อัตราส่วนเลขนัสเซลท์และค่าอัตราส่วนประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น เมื่อ  $D_{R,o}$  ลดลง จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และค่าอัตราส่วนประกอบเสียดทานลดลง แต่เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของ  $D_{R,o}$  ที่ให้ผลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ดังรูปที่ 5.59 พบว่าที่  $D_{R,o} = 0.99$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมนั้นให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดในช่วง 2.16-1.30 ที่  $Re = 3,000-20,000$  ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงที่สุดจากค่าของ  $D_{R,o}$  ทั้งหมดที่นำมาทดลอง และเห็นได้ว่าหากค่า  $D_{R,o}$  ยิ่งมีค่ามากจะทำให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงตามไปด้วย ดังนั้น ในการศึกษาถึงตัวแปรอื่นในหัวข้อถัดไปจะกำหนดให้อัตราความกว้างทางเข้าแหวนทรงกรวยอยู่ที่  $D_{R,i} = 0.6$  ทุกกรณี และกำหนดให้อัตราความกว้างทางออกให้มากที่สุด โดยแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมอยู่ที่  $D_{R,o} = 0.83$  และ  $D_{R,o} = 0.99$  สำหรับหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

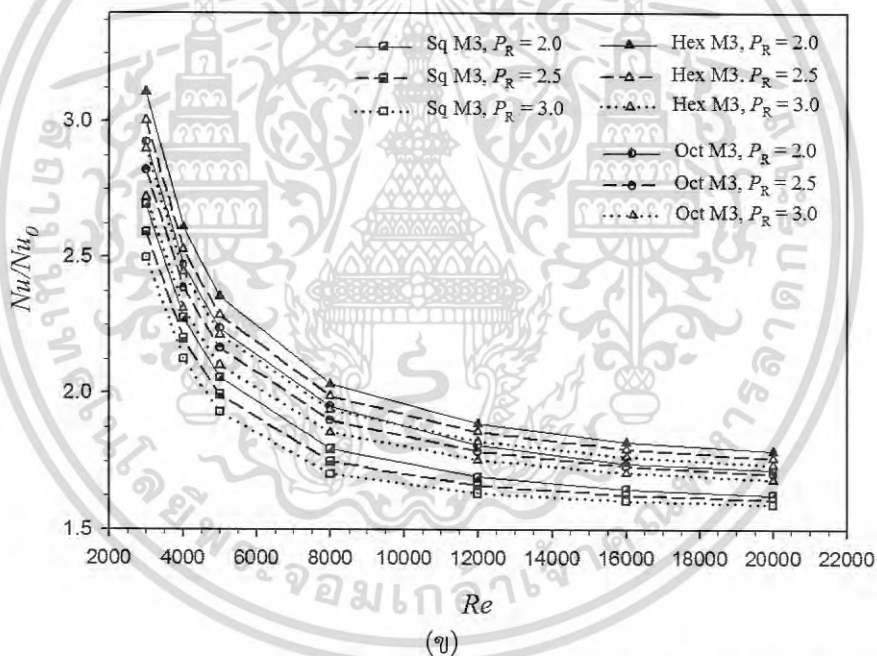
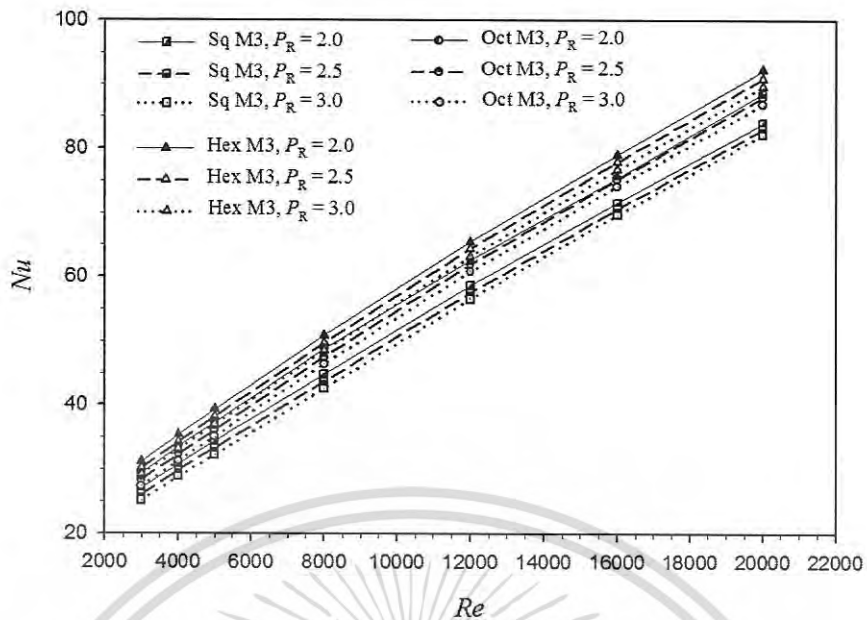


รูปที่ 5.59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่  $D_{R,o} = (0.79, 0.95), (0.81, 0.97)$  และ  $(0.83, 0.99)$

### 5.8 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอิทธิพลอัตราส่วนความกว้างทางเข้าที่  $D_{R,i} = 0.6$  และอิทธิพลอัตราส่วนความกว้างทางออกที่  $D_{R,o} = 0.83$  และ  $0.99$  ให้ผลของสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดในการศึกษาที่ผ่านมา ดังนั้น ในหัวข้อต่อไปนี้จะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ถึงผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ที่แตกต่างกันตั้งแต่  $P_R = 2.0, 2.5$  และ  $3.0$  โดยทำการศึกษาที่  $D_{R,i} = 0.6$  และ  $D_{R,o} = 0.83$  สำหรับแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และ  $D_{R,o} = 0.99$  สำหรับแหวนทรงกรวยหกและแปดเหลี่ยม

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซิลท์ ( $Nu$ ) และอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนพิตช์  $P_R = 2.0, 2.5$  และ  $3.0$  ที่สภาวะตัวแปร  $D_{R,i} = 0.6, D_{R,o} = 0.83$  และ  $0.99$ , aspect ratio =  $0.67, \alpha_2 = 11.5^\circ$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส์  $Re = 3,000-20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.61

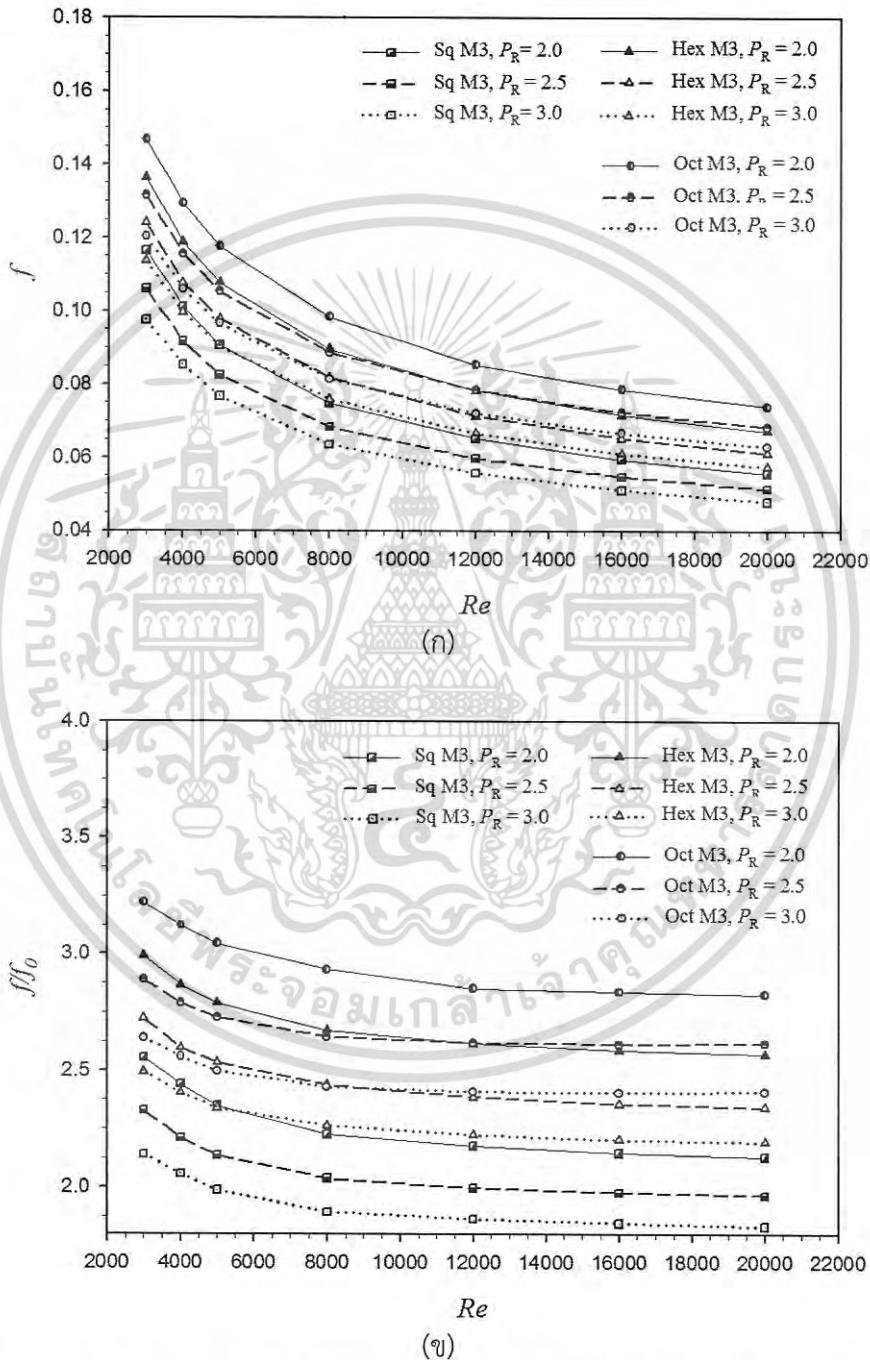


รูปที่ 5.60 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่  $P_R = 2.0, 2.5$  และ  $3.0$  (ก)ค่าเลขนัสเซลท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์

จากรูปที่ 5.61 แสดงให้เห็นกราฟค่าเลขนัสเซลท์และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่  $P_R = 2.0, 2.5$  และ  $3.0$  เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง  $31.20-2.26$  ที่  $P_R = 2.0$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม และอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ในช่วง  $3.11-1.79$  เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $P_R = 2.0$  ในช่วงของ  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมเช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือค่าของแหวนทรงกรวยแปดเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมตามลำดับ และผลของอัตราส่วนพิทซ์ที่ให้ผลลัพธ์เรียงจากมากไปน้อยคือ  $P_R = 2.0, 2.5$  และ  $3.0$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 เมื่อใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนพิทช์  $P_R = 2.0, 2.5$  และ  $3.0$  ที่สภาวะตัวแปร  $D_{R,i} = 0.6, D_{R,o} = 0.83$  และ  $0.99$ , aspect ratio =  $0.67$ ,  $\alpha_2 = 11.5^\circ$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 3,000-20,000$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.62

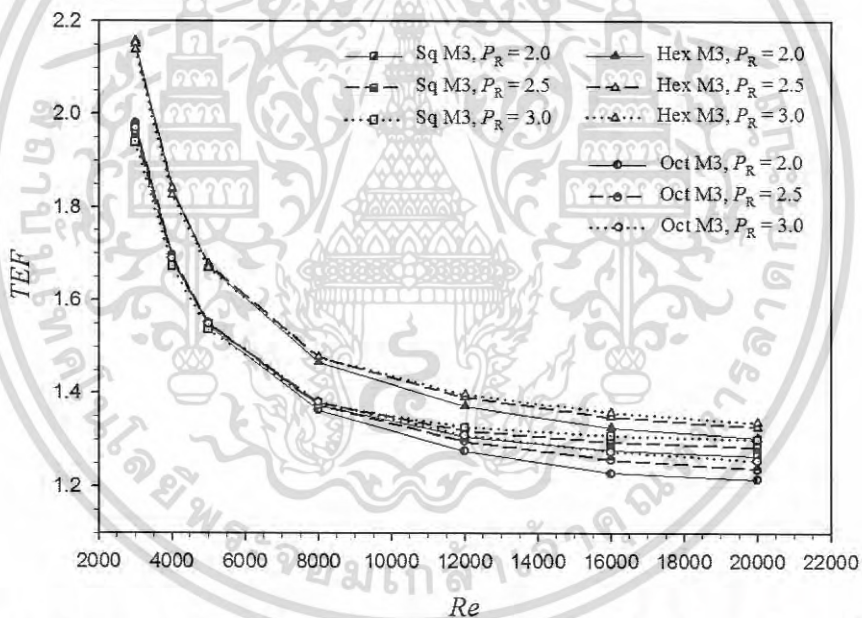


รูปที่ 5.61 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่  $P_R = 2.0, 2.5$  และ  $3.0$  (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.62 แสดงให้เห็นค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่  $P_R = 2.0, 2.5$  และ  $3.0$  เมื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มค่า  $P_R$  ทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลง โดยค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง  $0.10-0.05$  ที่  $P_R = 3.0$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง  $2.14-1.83$  เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $P_R = 3.0$  ในช่วงของ  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้สูงขึ้นเป็นลำดับถัดมาคือค่าจากแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมตามลำดับ และผลของอัตราส่วนพิตซ์ที่ให้ผลลัพธ์เรียงจากมากไปน้อยคือ  $P_R = 2.0, 2.5$  และ  $3.0$  ตามลำดับ

สามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่า  $P_R$  เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้อัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์และค่าอัตราส่วนประกอบเสียดทานลดน้อยลง เมื่อ  $P_R$  ลดลง จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์และค่าอัตราส่วนประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของ  $P_R$  ที่ให้ผลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ดังรูปที่ 5.63 พบว่าที่  $P_R = 2.5$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมนั้นให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดในช่วง  $2.16-1.33$  ที่  $Re = 3,000-20,000$  ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงที่สุด ดังนั้นในการศึกษาถึงตัวแปรอื่นในหัวข้อถัดไปจะกำหนดให้อัตราส่วนพิตซ์  $P_R = 2.5$  ในทุกๆ กรณี



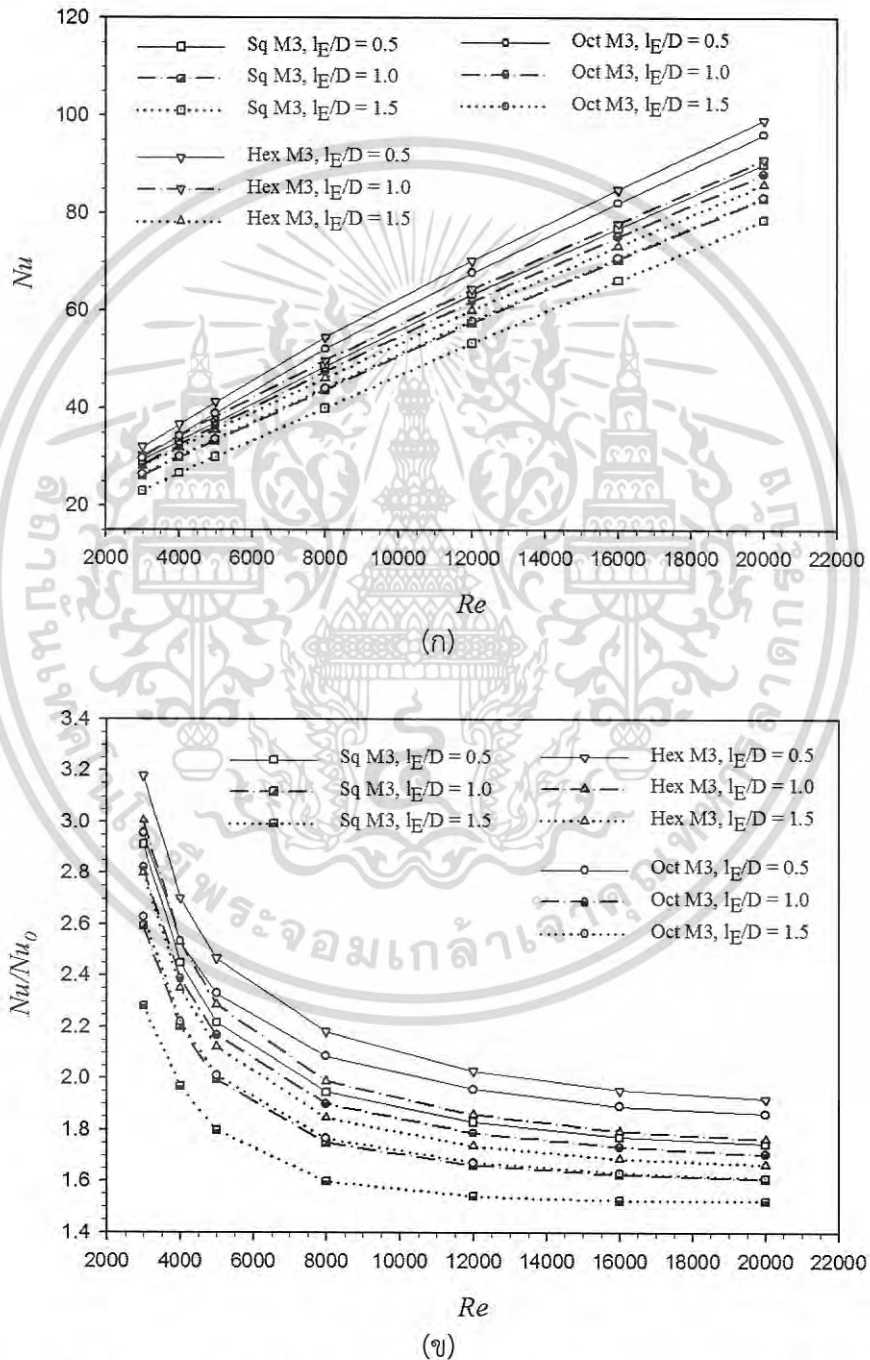
รูปที่ 5.62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่  $P_R = 2.0, 2.5$  และ  $3.0$

## 5.9 อิทธิพลของอัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อความกว้างท่อกลม

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอิทธิพลอัตราส่วนความกว้างของทางเข้าที่  $D_{R,i} = 0.6$  และอิทธิพลอัตราส่วนความกว้างทางออกที่  $D_{R,o} = 0.83$  และ  $0.99$  และอัตราส่วนพิตซ์  $P_R = 2.5$  ให้ผลของสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดในการศึกษาที่ผ่านมา ดังนั้น ในหัวข้อต่อไปนี้จะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อกลมหรือ  $l_E / D$  ว่ามีผลต่อค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์ ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนอย่างไรบ้าง โดยทำการศึกษาอิทธิพลที่แตกต่างกันตั้งแต่  $l_E / D = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$D_{R,i} = 0.6$  และ  $D_{R,o} = 0.83$  สำหรับแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และ  $D_{R,o} = 0.99$  สำหรับแหวนทรงกรวยหกและแปดเหลี่ยม และที่  $P_R = 2.5$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลล์ท์ ( $Nu$ ) และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณา  $l_E/D = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ที่สภาวะตัวแปร  $D_{R,i} = 0.6, D_{R,o} = 0.83$  และ  $0.99$ , aspect ratio =  $0.67$ ,  $\alpha_2 = 11.5^\circ$ ,  $P_R = 2.5$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส์  $Re = 3,000-20,000$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.64

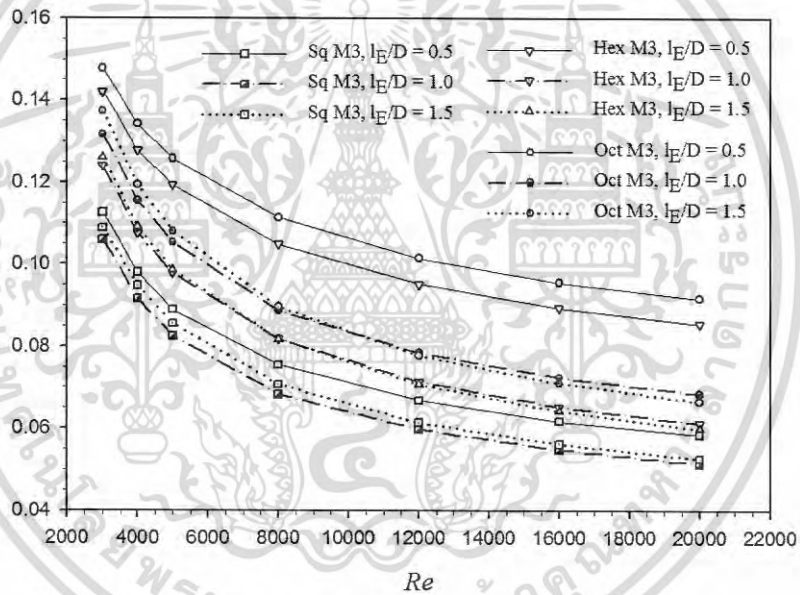


รูปที่ 5.63 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่  $l_E/D = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  (ก)ค่าเลขนัสเซลล์ท์ (ข)ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์

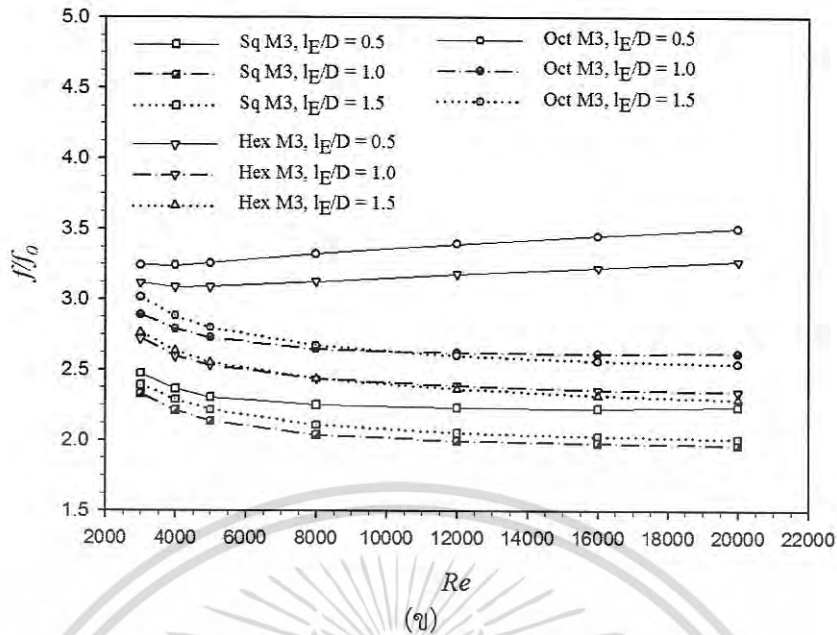
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.64 แสดงให้เห็นกราฟค่าเลขนัสเซลล์ต์และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่  $l_E/D = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าเลขนัสเซลล์ต์สูงสุดอยู่ในช่วง 31.93-95.15 ที่  $l_E/D = 0.5$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยม และอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต์สูงสุดอยู่ในช่วง 3.18-1.92 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $l_E/D = 0.5$  ในช่วงของ  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมเช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้เป็นลำดับถัดมาคือค่าของแหวนทรงกรวยแปดเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมตามลำดับ และผลของ  $l_E/D$  ที่ให้ผลลัพธ์เรียงจากมากไปน้อยคือ  $l_E/D = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ตามลำดับ

ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 เมื่อใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณา  $l_E/D$  ที่  $0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ที่สภาวะตัวแปร  $D_{R,i} = 0.6, D_{R,o} = 0.83$  และ  $0.99$ , aspect ratio =  $0.67, \alpha_2 = 11.5^\circ, P_R = 2.5$  และช่วงของเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 3,000-20,000$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.64 กราฟแสดงความสัมพันธ์เทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่  $l_E/D = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  (ก)ค่าตัวประกอบเสียดทาน (ข)ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

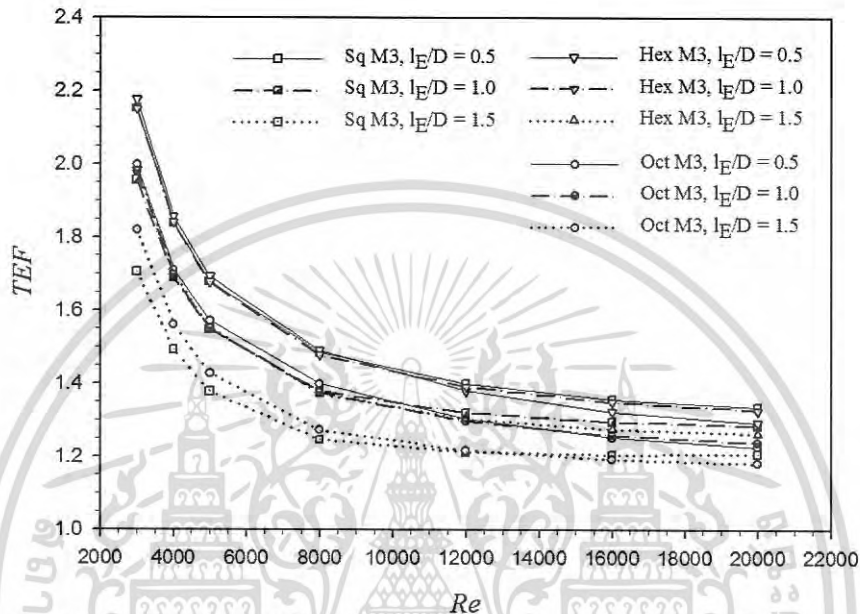
จากรูปที่ 5.65 แสดงให้เห็นค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่  $l_E/D = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ผลที่ได้พบว่า การเพิ่มค่า  $l_E/D$  ทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดน้อยลง โดยค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง  $0.11-0.05$  ที่  $l_E/D = 1.0$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง  $2.33-1.96$  เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $l_E/D = 1.0$  ในช่วงของ  $Re = 3,000-20,000$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกัน ส่วนค่าที่ได้สูงขึ้นเป็นลำดับถัดมาคือค่าจากแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมตามลำดับ และผลของ  $l_E/D$  ที่ให้ผลลัพธ์เรียงจากมากไปน้อยคือ  $l_E/D = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ตามลำดับ

จากผลการศึกษาจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อ  $l_E/D$  เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้อัตราส่วนเลขนัสเซิลต์ลดน้อยลง เมื่อ  $l_E/D$  ลดลง เช่นเดียวกับกับค่าตัวประกอบเสียดทานที่มีแนวโน้มลดน้อยลงเมื่อเพิ่มค่า  $l_E/D$  แต่เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของ  $l_E/D$  ที่ให้ผลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ดังรูปที่ 5.66 พบว่า

- ที่  $l_E/D = 0.5$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมนั้นให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงที่สุดเท่ากับ  $2.18$  ที่  $Re = 3,000$  ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าของ  $l_E/D = 1.0$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมที่มีค่าเท่ากับ  $2.15$  แต่เมื่อพิจารณาเป็นช่วงพบว่าที่  $l_E/D = 1.0$  ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมนั้นให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนอยู่ในช่วง  $2.15-1.33$  ที่  $Re = 3,000-20,000$  ขณะที่  $l_E/D = 0.5$  มีค่าเพียง  $2.18-1.25$  ดังนั้นจะถือว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่วงของ  $2.15-1.33$  มีผลที่ดีกว่าเมื่อนำไปใช้งานในช่วงของเลขเรย์โนลด์ส์กว้างกว่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- และเมื่อพิจารณาที่  $l_E / D = 0.5$  ของแหวนทรงกรวยสี่เหลี่ยม ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้มีค่าเท่ากับ 2.15-1.34 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่า ซึ่งมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแหวนกรวยหกเหลี่ยมข้างต้น แต่ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์จากแหวนหกเหลี่ยมมีค่ามากกว่าแหวนสี่เหลี่ยม จึงถือว่าจากแหวนหกเหลี่ยมที่  $l_E / D = 1.0$  เป็นค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองทั้งหมด



รูปที่ 5.65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเทียบกับเลขเรย์โนลด์ส์ของแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 ที่  $l_E / D = 0.5, 1.0$  และ 1.5

### 5.10 การอภิปรายผลงานวิจัย

จากการทำการศึกษาเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมของผู้วิจัยพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหลและเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่เนื่องจากการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีผลกับค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่าอัตราการเพิ่มของค่าตัวประกอบเสียดทานที่เพิ่มขึ้นมากกว่าหลายเท่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับการช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานซึ่งได้ทำการศึกษารูปทรงมุมปะทะ ( $\alpha$ ) อัตราส่วนความกว้างทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวย ( $D_{R,i}, D_{R,o}$ ) อัตราส่วนพิตช์ ( $P_R$ ) และอัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลม ( $l_E / D$ ) ที่เหมาะสมในการปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวย จากการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้พบว่า การปรับปรุงแหวนทรงกรวยโดยทำมุมปะทะที่ทางออกเป็นรูปทรงลิ้มกลับที่คั่นนั้นเป็นรูปทรงที่ปรับปรุงแล้วเหมาะสมที่สุด เนื่องจากทำมุมปะทะกับตัวของแหวนทรงกรวยได้มาก ทำให้ลดอัตราตัวประกอบเสียดทานลงไปได้มากเช่นกัน โดยลักษณะมุมปะทะของแหวนทรงกรวยแบบลิ้มกลับทิศคือมีมุมปะทะที่ทางเข้า  $90^\circ$  และที่ทางออก  $11.5^\circ$  โดยอัตราส่วนความกว้างที่ทางเข้าแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมเท่ากับ 0.6 อัตราส่วนความกว้างที่ทางออกของแหวนทรงกรวยเท่ากับ 0.83 (สี่เหลี่ยม) และ 0.99 (หกและแปดเหลี่ยม) อัตราส่วนพิตช์เท่ากับ 2.5 และที่  $l_E / D$

ค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 1.0 ของแหวนทรงกรวยหกเหลี่ยมให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่เหมาะสมที่สุดในช่วง 2.15-1.33 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์ส 3,000-20,000

ผลที่ได้จากการศึกษาแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่ใส่ภายในท่อกลม โดยการปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมในรูปแบบต่างๆ นั้น สามารถสรุปผลที่ได้จากรูปทรงแหวนทรงกรวยที่ดีที่สุดในแต่ละกรณี ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลที่ดีที่สุดในแต่ละกรณีที่ได้จากการศึกษาแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมเมื่อใส่ภายในท่อกลม

รูปแบบของการศึกษา	$Nu/Nu_0$ ( $Re = 3,000-20,000$ )	$f/f_0$ ( $Re = 3,000-20,000$ )	TEF ( $Re = 3,000-20,000$ )	หมายเหตุ
แบบดั้งเดิม $D_{R,i} = 0.6, D_{R,o} = 0.81, P_R = 2.0$	2.56-1.97	18.81-26.10	0.96-0.66	ทรงสี่เหลี่ยม
ปรับปรุงแบบที่ 1 ( $\alpha_r = 0.4, 0.67, 0.8$ ) $D_{R,i} = 0.6, D_{R,o} = 0.97, P_R = 2.0$	2.46-2.01	14.36-18.14	1.01-0.77	ทรงแปดเหลี่ยม $\alpha_r = 0.67$
ปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงกลม) $D_{R,i} = 0.6, D_{R,o} = 0.97, \alpha_r = 0.67, P_R = 2.0$	3.42-1.92	4.38-4.01	2.09-1.21	ทรงหกเหลี่ยม
ปรับปรุงแบบที่ 3 (ทรงกลมกลับทิศ) $D_{R,i} = 0.6, D_{R,o} = 0.97, \alpha_r = 0.67, P_R = 2.0$	3.01-1.75	2.93-2.50	2.12-1.29	ทรงหกเหลี่ยม
ปรับปรุงแบบที่ 4 (ทรงเพชร) $D_{R,i} = 0.6, D_{R,o} = 0.97, \alpha_r = 0.67, P_R = 2.0$	3.18-1.80	3.37-2.89	2.12-1.26	ทรงหกเหลี่ยม ระยะตัด $0.25D$
อิทธิพลของความกว้างอัตราส่วนทางเข้า (ทรงกลมกลับทิศ) $P_R = 2.0, D_{R,i} = 0.5-0.7$	3.01-1.75	2.93-2.50	2.12-1.29	ทรงหกเหลี่ยม $D_{R,i} = 0.6$
อิทธิพลของความกว้างอัตราส่วนทางออก (ทรงกลมกลับทิศ) $D_{R,i} = 0.6, P_R = 2.0,$ $D_{R,o} = (0.79-0.83), (0.95-0.99)$	3.11-1.79	2.99-2.57	2.16-1.30	ทรงหกเหลี่ยม $D_{R,o} = 0.99$
อิทธิพลของอัตราส่วนพิทช์ (ทรงกลมกลับทิศ) $D_{R,i} = 0.6, D_{R,o} = (0.83, 0.99),$ $P_R = 2.0, 2.5$ และ $3.0$	3.00-1.76	2.72-2.34	2.16-1.33	ทรงหกเหลี่ยม $P_R = 2.5$
อิทธิพลของ $l_E / D$ (ทรงกลมกลับทิศ) $D_{R,i} = 0.6, D_{R,o} = (0.83, 0.99), P_R = 2.5,$ $l_E / D = 0.5, 1.0$ และ $1.5$	3.00-1.76	2.72-2.34	2.16-1.33	ทรงหกเหลี่ยม $l_E / D = 1.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการศึกษา

#### 6.1.1 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์สเมื่อใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมภายในท่อกลม

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของค่าเลขเรย์โนลด์สพบว่าเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $Nu/Nu_0$  มีแนวโน้มลดลง ส่วน  $f/f_0$  มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อไม่ได้ทำมุมปะทะ และลดน้อยลงเมื่อทำมุมปะทะ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นทำให้เกิดค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง นอกจากนี้ยังส่งผลถึงค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับกรณีที่ไม่ได้ทำมุมปะทะด้วย สำหรับกรณีที่ทำการศึกษา พบว่าที่  $Re = 20,000$  จะให้ค่า  $Nu/Nu_0$  น้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผลที่เกิดขึ้นกับตัวประกอบเสียดทานยังต้องพิจารณาเป็นในแต่ละกรณีไป และนอกจากค่าเลขเรย์โนลด์สจะมีผลต่อ  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  แล้ว ค่าเลขเรย์โนลด์สยังมีผลต่อความปั่นป่วนของการไหลอีกด้วย โดยเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สสูงขึ้นจะทำให้เกิดการปั่นป่วนของการไหลมากขึ้นด้วย

#### 6.1.2 อิทธิพลของมุมปะทะหรือมุมที่ทำการปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม

อิทธิพลที่เกิดจากมุมปะทะนั้นพบว่าที่การปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยให้มีขนาดมุมปะทะเล็กๆ ช่วยให้ค่าความดันตกคร่อมและค่าการถ่ายเทความร้อนลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เสียไปน้อยกว่าค่าความดันตกคร่อมที่ลดลง การทำมุมปะทะให้มีขนาดเล็กจึงมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากกว่าเดิม ดังนั้นการปรับปรุงแหวนทรงกรวยจึงได้ทำการศึกษาแหวนทรงกรวยที่ปรับปรุงมุมปะทะได้เล็กที่สุด

#### 6.1.3 อิทธิพลของการปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยม

สำหรับการพัฒนาแหวนทรงกรวยที่มีจุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมให้น้อยลง โดยการปรับปรุงแหวนทรงกรวยให้เป็นทรงลิ้มกลับทิศ พบว่าจะช่วยลดค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นได้ นอกจากนี้เมื่อนำแหวนทรงกรวยลิ้มกลับทิศใส่ภายในท่อกลมยังช่วยให้ค่าการกระจายของการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวท่อมีค่ามากขึ้น จึงช่วยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากของไหลของของไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้นและสามารถไหลเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อได้ดียิ่งกว่าเดิม ดังนั้นการปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยจึงให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากกว่าการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลม และยังช่วยลดค่าความดันตกคร่อมลงจากแบบแหวนทรงกรวยดั้งเดิมได้อย่างมาก

#### 6.1.4 อิทธิพลของความกว้างของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่ทางเข้า

อิทธิพลของ  $D_{R,i}$  พบว่าเมื่อค่า  $D_{R,i}$  เพิ่มมากขึ้น ค่า  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  จะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า  $D_{R,i}$  เพิ่มมากขึ้นค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมก็จะมีค่าลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อลดค่า  $D_{R,i}$  ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นขณะเดียวกันก็ทำให้ค่าความดันตกคร่อมเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการเลือกใช้ควรเลือกค่า  $D_{R,i}$  ที่เหมาะสมกับช่วงของการนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.1.5 อิทธิพลของความกว้างของแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมที่ทางออก

อิทธิพลของ  $D_{R,0}$  พบว่าเมื่อค่า  $D_{R,0}$  เพิ่มมากขึ้น ค่า  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า  $D_{R,0}$  เพิ่มมากขึ้นค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่า  $D_{R,0}$  ส่งผลให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นกว่าเดิม เนื่องจากค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้มีมากกว่าค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มตามมา

### 6.1.6 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์

พิจารณาอิทธิพลของ  $P_R$  พบว่า เมื่อค่า  $P_R$  เพิ่มมากขึ้น ค่า  $Nu/Nu_0$  และค่า  $f/f_0$  จะมีค่าลดลง ส่วนที่ค่า  $P_R$  ต่ำๆ จะให้ค่า  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  สูง เนื่องจากเมื่อลดค่า  $P_R$  ทำให้ลักษณะการไหลของของไหลมีระยะการไหลตามยาวที่สั้นลง ทำให้เกิดความปั่นป่วนการไหลหมุนวนมากขึ้นแต่อย่างไรก็ตามก็ยังให้ค่าความดันตกคร่อมที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน จึงต้องพิจารณาที่สมรรถนะเชิงความร้อนและค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

### 6.1.7 อิทธิพลของอัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อความกว้างท่อกลม

พิจารณาอิทธิพลของ  $l_E/D$  พบว่า เมื่อค่า  $l_E/D$  เพิ่มมากขึ้น ค่า  $Nu/Nu_0$  และค่า  $f/f_0$  จะมีค่าลดลง ส่วนที่ค่า  $l_E/D$  ต่ำๆ จะให้ค่า  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  สูง เนื่องจากเมื่อลดค่า  $l_E/D$  ทำให้ลักษณะการไหลของของไหลมีระยะการไหลตามยาวที่สั้นลง และปะทะกับตัวแหวนทรงกรวยในระยะที่สั้นลงเช่นกัน ทำให้เกิดความปั่นป่วนการไหลหมุนวนมากขึ้นในช่วงของการไหล และส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมสูงขึ้นด้วยเช่นกัน การเลือกใช้งานจึงต้องพิจารณาที่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนและการถ่ายเทความร้อนควบคู่กันไปด้วย

## 6.2 ข้อเสนอแนะและการพัฒนางานวิจัย

จากผลงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้ทราบว่า การใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับทดสอบหาพฤติกรรมการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม มีข้อดีเนื่องจากสามารถช่วยประหยัดเวลาที่ใช้ในการจำลองการไหลและลดต้นทุนสำหรับอุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลองได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นเพียงการทำนายถึงผลการจำลองที่มีความเป็นไปได้ สำหรับการนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ศึกษาไปใช้งานจริงนั้น ค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ไต่ยังต้องคำนึงถึงความถูกต้องและแม่นยำของเครื่องมือวัดที่นำมาใช้ทำการศึกษาในงานจริงด้วย

สำหรับแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปนั้น เมื่อพิจารณาการใส่แหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมภายในท่อกลมซึ่งสามารถสร้างความปั่นป่วนของการไหล สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ แต่เนื่องจากในการศึกษาแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมภายในท่อกลมนั้นยังให้ค่าความดันตกคร่อมที่สูงจึงมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนยังไม่สูงมากนัก จากการศึกษาพบว่ามุมการปะทะที่ลดลงมีผลกับการลดค่าความดันตกคร่อมได้ดี ดังนั้นการศึกษารูปแบบการปรับปรุงในลักษณะอื่นเพิ่มเติมจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจต่อการนำไปศึกษาในอนาคตสำหรับการปรับปรุงแหวนทรงกรวยหลายเหลี่ยมต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Nianben, Z., Peng, L., Feng, S., Zhichun, L. and Wei, L. "Heat transfer enhancement in a novel internally grooved tube by generating longitudinal swirl flows with multi-vortexes" **Applied Thermal Engineering**. vol.95, Nov 2016. pp. 421–432.
- [2] David, J.K., Rick, S. and Wei, L. "Comparison of condensation and evaporation heat transfer on the outside of smooth and enhanced 1EHT tubes" **Applied Thermal Engineering**. vol.105, Mar 2016. pp. 913–922.
- [3] Piroz, Z. "Heat transfer in counterflow heat exchangers with helical turbulators" **Common Nonlinear Sci Numer Simulat** vol.15, Oct 2010. pp. 2894–2907.
- [4] Promvongse, P., Jedsadaratanachai, W. and Kwankaomeng, S. "Numerical study of laminar flow and heat transfer in square channel with 30° inline angled baffle turbulators" **Applied Thermal Engineering** vol.30, Feb 2010. Pp. 1292–1303.
- [5] Promvongse, P. "Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators" **Energy Conversion and Management** vol.49, Aug 2008. pp. 2949–2955.
- [6] Promvongse, P. and Eiamsa-ard, S. "Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted-tape insert" **International Communications in Heat and Mass Transfer** vol.34, May 2007. pp. 849–859.
- [7] Aiwu, F., Junjie, D., Jian, G. and Wei, L. "A numerical study on thermo-hydraulic characteristics of turbulent flow in a circular tube fitted with conical strip inserts" **Applied Thermal Engineering** vol.31, May 2011. pp. 2819–2828.
- [8] Thianpong, C., Eiamsa-ard, P., Wongcharee, K. and Eiamsa-ard, S. "Compound heat transfer enhancement of a dimpled tube with a twisted tape swirl generator" **International Communications in Heat and Mass Transfer** vol.36, May 2009. pp. 698–704.
- [9] Patankar, S.V., Liu, C.H. and Sparrow, E.M. "Fully developed flow and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of cross-sectional area" **ASME J. Heat Transfer** 1977. pp. 180–186.
- [10] Yakut, K., Sahin, B., and Canbazoglu, S. "Flow induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers" **Applied Energy** vol.78, Sep 2004. pp. 273–288.
- [11] Durmus, A. "Heat transfer and exergy loss in cut out conical turbulators" **Energy Conversion and Management** vol.45, Jul 2004. pp. 785–796.

- [12] Promvonge, P., and Eiamsa-ard, S. “Heat transfer and turbulent flow friction in a circular tube fitted with conical-nozzle turbulators” **International Communications in Heat and Mass Transfer** vol.34, Sep 2006. pp. 72–82.
- [13] Promvonge, P. “Heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts” **Energy Conversion and Management** vol.49, Jul 2007. pp. 8–15.
- [14] Kongkaipaiboon, V., Nanan K., and Eiamsa-ard S. “Experimental investigation of heat transfer and turbulent flow friction in a tube fitted with perforated conical-ring” **International Communications in Heat and Mass Transfer** vol.37, Feb 2010. pp. 560 -567.
- [15] Anvari, A.R., Lotfi, R., Rashidi, A.M., and Sattari, S. “Experimental research on heat transfer of water in tubes with conical ring inserts in transient regime” **International Communications in Heat and Mass Transfer** vol.38, Mar 2011. pp. 668–671.
- [16] Durmus, A., and Karakaya, H. “Heat transfer and exergy loss in conical spring turbulators” **International Journal of Heat and Mass Transfer** vol.50, Feb 2013. pp. 756–762.
- [17] Muthusamy, C., Vivar, M., Skryabin, I. and Srithar, K. “Effect of conical cut-out turbulators with internal fins in a circular tube on heat transfer and friction factor” **International Communications in Heat and Mass Transfer** vol.44, Apr 2013. pp. 64-68.
- [18] Anvari, A.R., Javaherdeh, K., Emami-Meibodi, M., and Rashidi, A.M. “Numerical and experimental investigation of heat transfer behavior in a round tube with the special conical ring inserts” **Energy Conversion and Management** vol.88, Sep 2014. pp. 214–217.
- [19] Sheikholeslami, M., Ganji, D.D., and Gorji-Bandpy, M. “Experimental and numerical analysis for effects of using conical spring ring on turbulent flow and heat transfer in a double pipe air to water heat exchanger” **Applied thermal Engineering** vol.100, Mar 2016. pp. 805–819.
- [20] Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P. and Dewitt, D.P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7th ED. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc. 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

## คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg.K)	$\mu \times 10^7$ (N.s/m <sup>3</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \times 10^6$ (W/m.K)	$\alpha \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5<sup>th</sup> - 8<sup>th</sup> July 2016, PSU, Songkhla

# The 30<sup>th</sup> Conference

## of Mechanical Engineering Network of Thailand

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30

วันที่ 5-8 กรกฎาคม 2559

ณ โรงแรม บีที สมิทลา บีช โฮเต็ล แอนด์ รีสอร์ท  
อ.เมือง จ.สงขลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อที่ใส่พีระมิดปลายตัด Flow and Heat Transfer Simulations in Round Tube with Truncated Pyramids

ราชันย์ พูลเพิ่ม<sup>1</sup>, สมบัติ ทานา<sup>2\*</sup>, สมพล สุกหลง<sup>3</sup>, วทีญญู ไพโรจน์<sup>1</sup> และ พงษ์เจต พรหมวงศ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

<sup>2</sup> ห้องปฏิบัติการวิจัยคณิตศาสตร์ประยุกต์และกลศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น เลขที่ 1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

<sup>3</sup> สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา เลขที่ 199 ถนนสุขุมวิท ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

\*ติดต่อ: sombat\_ac@tni.ac.th, โทรศัพท์ 0-2763-2600, โทรสาร 0-2763-2600 ต่อ 2900

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใส่พีระมิดปลายตัดที่เป็นตัวสร้างการไหลปั่นป่วน การคำนวณเป็นการไหลแบบปั่นป่วนสามมิติ ที่มีลักษณะการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วงของการไหล (periodic flow) โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ซึ่งพิจารณาการไหลที่เลขเรย์โนลด์สอยู่ในช่วง 3,000 ถึง 20,000 พีระมิดที่ใส่ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นพีระมิดปลายตัดตรงขนานกับฐานโดยมีฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม ตามลำดับ การศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนได้นำเสนอในเทอมของเลขนัสเซลท์ (Nu) และการสูญเสียความดันแสดงในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) จากผลการคำนวณพบว่าท่อที่ใส่พีระมิดให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อเปล่าผิวเรียบ โดยพบว่ากรณีพีระมิดที่มีฐานรูปหกเหลี่ยมให้ค่าการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดในกรณีพีระมิดที่ศึกษา ขณะเดียวกันการใส่พีระมิดปลายตัดเข้าไปในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนก็เพิ่มค่าความดันตกคร่อมอีกด้วย

**คำหลัก:** การจำลองเชิงตัวเลข; การถ่ายเทความร้อน; พีระมิด; ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน; การไหลปั่นป่วน

### Abstract

This work presents a numerical study on heat transfer augmentation in a circular tube inserted with truncated-pyramid turbulators. The computations are based on a three dimensional turbulent fully developed periodical flow by using air as the test fluid for Reynolds number ranging from 3,000 to 20,000. The pyramid inserted into the circular tube is cut at its tip where three pyramid bases are set to square, hexagonal and octagonal shapes. The investigations of heat transfer and pressure drop are, respectively, displayed in forms of Nusselt number (Nu) and friction factor ( $f$ ). As per numerical results, it is found that the use of pyramid turbulators provides higher heat transfer rate than the case of smooth tube. The hexagonal one yields higher heat transfer rate than other shapes meanwhile it also increases considerably higher pressure drop.

**Keywords:** numerical simulation; heat transfer; pyramid; heat exchanger tube; turbulent flow.

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้มีบทบาทอย่างมากในวงการอุตสาหกรรมและถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานรูปแบบต่างๆ เช่น การถ่ายเทความร้อน

การทำความเย็น อุตสาหกรรมเคมี การผลิตชิ้นงานจากวัสดุต่างๆ และอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นต้องมีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน

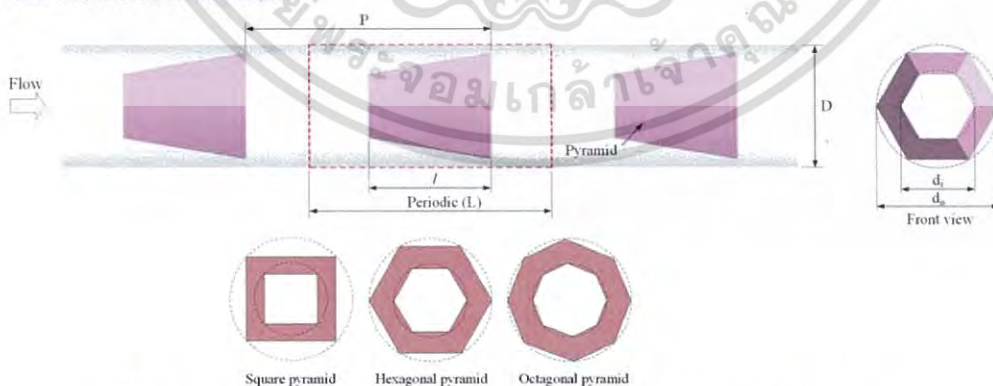
การติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการสอดใส่ตัวสร้างการไหลหมุนวนหรือ turbulators เข้าสู่ด้านในของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งวิธีการนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นหลักการที่ไม่ซับซ้อน การซ่อมบำรุงง่าย ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนที่ดี และที่สำคัญคือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนโดยไม่ต้องใช้พลังงานใดๆเป็นตัวขับเคลื่อน (passive) ซึ่งปรากฏในงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตมากมาย เช่น Kongkaitpaiboon และคณะ [1] ได้ทดลองนำวงแหวนติดตั้งภายในท่อกลมที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางวงแหวนต่อท่อกลมต่างกัน พบว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 57%-195% เมื่อเทียบกับท่อเปล่า Promvongse [2] ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการไหลผ่านท่อกลม โดยการสอดใส่วงแหวนกรวยที่ค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางวงแหวนต่อท่อกลมต่างกัน พบว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นที่ 197%-333% Dermis [3] ได้ศึกษาการใส่วงแหวนกรวยที่ทำมุมต่างๆ เพื่อศึกษาถึงการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน Yakut และ Sahin [4] ทดลองถึงพฤติกรรมของไหลที่เกิดจากตัวสร้างการไหลหมุนวน โดยพิจารณาถึงประสิทธิภาพทางความร้อนและค่าความดันตกคร่อมจากการสันสะท้อน รูปแบบการไหลของของไหลผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะถูกกำหนดให้เป็นการปรับตัวเต็มที่ในท่อ (fully develop) และมีการไหลทางเข้าและทางออกลักษณะแบบเป็นคาบ (periodic) ซึ่งถูกนำเสนอโดย Patankar และคณะ [5] ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลและพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่เพิ่มตัวสร้างการไหลหมุนวนในลักษณะรูปร่างต่าง ๆ จากหลักการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

จากข้อมูลต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น การใช้ตัวสร้างการไหลหมุนวนรูปแบบวงแหวนและกรวยสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ดัดแปลงจากตัวสร้างการไหลหมุนวนแบบกรวยขึ้นมา โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงพีระมิดปลายตัดตรงขนานกับฐาน 3 รูปแบบ ได้แก่ พีระมิดฐานสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม ตามลำดับ สอดใส่ภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอากาศไหลผ่าน ใช้การคำนวณเชิงตัวเลขผ่านวิธีการใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) ที่มีความแม่นยำสูงในการปฏิบัติงานในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ ของไหลที่ไหลผ่านภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอากาศที่ไหลเข้าแบบปั่นป่วน (turbulent) ซึ่งคาดหวังว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนได้ดีกว่าท่อเปล่า

## 2. โครงสร้างการไหลและสมการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง

ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีลักษณะเป็นการไหลของอากาศผ่านภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนรูปทรงพีระมิดปลายตัดตรงขนานกับฐานเข้ากับด้านในของผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งขนาดของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการจำลอง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $D=50$  mm รูปทรงพีระมิดที่นำมาใช้เป็นตัวสร้างการไหลหมุนวนมี 3 รูปแบบ ได้แก่ พีระมิดฐานสี่เหลี่ยม ฐานหกเหลี่ยม และฐานแปดเหลี่ยม ตามลำดับ ซึ่งฐานและปลายตัดพีระมิดหลายเหลี่ยมอยู่ในวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_i$  และ  $d_o$

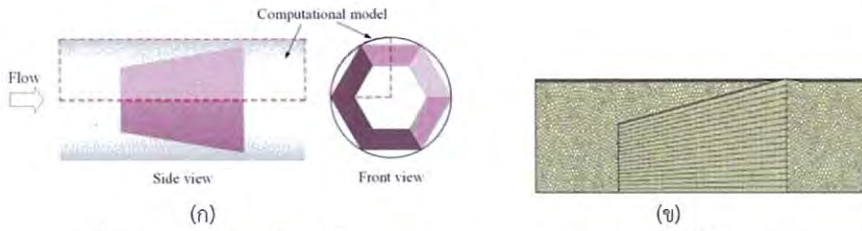


รูปที่ 1 โครงสร้างทางกายภาพของแบบจำลอง และขอบเขตการจำลองที่คิดการไหลแบบ periodic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CST0021

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



รูปที่ 2 (ก) ขอบเขตแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ และ (ข) รูปแบบของกริดที่ใช้ในการคำนวณ

โดยตัวพีระมิดมีความยาว  $l = 50$  mm ขนาดของหน้าตัดพีระมิดด้านนอก  $d_o = 49.9$  mm หน้าตัดด้านเข้าที่เล็กกว่าหน้าตัดด้านออกเท่ากับ  $D_{in} = d/D = 0.6$  อัตราส่วนระยะห่างพีระมิดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ หรืออัตราส่วนระยะพิทช์ (pitch ratio) คงที่  $P_r = P/D = 2$  ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพิจารณาการไหลเป็นแบบคาบ (periodic) อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากพีระมิดที่ใช้มีลักษณะสมมาตร จึงพิจารณาแบบจำลองและกริดที่ใช้ในการคำนวณเพียง 1 ใน 4 ของท่อ ดังแสดงในรูปที่ 2

## 2.2 สมมติฐาน

การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทรงกลมที่ติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนฐานพีระมิดมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

การไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ โดยมีกริดแบบปั่นป่วนและเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ กำหนดให้คุณสมบัติของของไหลคงที่ไม่คำนึงถึงแรงของวัตถุ รวมถึงการสูญเสียเนื่องจากความหนืดและการแผ่รังสีความร้อน อุณหภูมิที่ผิวท่อด้านในมีค่าคงที่ ไม่คำนึงถึงความหนาของท่อและความหนาของตัวสร้างการไหลหมุนวน รวมทั้งผลจากการนำความร้อนที่ตัวสร้างการไหลหมุนวน

## 2.3 สมการที่เกี่ยวข้อง

จากสมมติฐานข้างต้น สำหรับการไหลผ่านตัวสร้างการไหลหมุนวนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน สมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการนาเวียร์-สโตก และสมการพลังงาน โดยโมเดลแบบจำลองการไหลปั่นป่วนใช้แบบจำลอง k-ε แบบ Realizable สมการต่างๆ สามารถเขียนอยู่ในรูปเทนเซอร์ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right] \quad (2)$$

สมการพลังงาน:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma + \Gamma_T \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (3)$$

เมื่อ  $\Gamma$  และ  $\Gamma_T$  คือ การแพร่ทางความร้อน และการแพร่ทางความร้อนแบบปั่นป่วนตามลำดับ

$$\Gamma = \frac{\mu}{Pr} \quad \text{และ} \quad \Gamma_T = \frac{\mu}{Pr_T} \quad (4)$$

สมการควบคุมทั้งหมดซึ่งได้แก่สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงานจะใช้แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก (QUICK) และทำการคำนวณหาผลเฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยการใช้แผนผังวิธีแบบ SIMPLE ในการปฏิบัติการ

ในการวิจัยครั้งนี้มีตัวแปรที่ให้ความสนใจอยู่ 4 ตัวแปร คือ เลขเรย์โนลด์ส ( $Re$ ) ตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) เลขนัสเซลท์ ( $Nu$ ) และสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์ส สามารถนิยามได้โดย

$$Re = \frac{\bar{V} D}{\nu} \quad (5)$$

สำหรับตัวประกอบเสียดทาน สามารถคำนวณได้จากความดันตกคร่อม, ( $\Delta p$ ) ตลอดของช่วงความยาว periodic ที่อากาศไหลผ่านตลอดแนวความยาวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนี้

$$f = \frac{2}{(L/D)} \frac{(\Delta P)}{\rho \bar{V}^2} \quad (6)$$

การถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณหาได้จากเลขนัสเซลท์ที่จุดใดๆ สามารถเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (7)$$

และสมรรถนะเชิงความร้อน

$$IEF = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (8)$$

เมื่อ  $Nu_0$  และ  $f_0$  คือ เลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนผิวเรียบตามลำดับ

#### 2.4 กริดอิสระ

สำหรับการวิจัยครั้งนี้ ใช้ระบบการแบ่งกริดที่ไม่สม่ำเสมอ (non-uniform grid) โดยประกอบด้วยกริดทรงสี่เหลี่ยมและวงรี ดังรูปที่ 3 (ข) การหาผลกระทบของจำนวนกริดที่มีผลต่อคำตอบนั้น ได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์โดยใช้จำนวนกริดที่แตกต่างกันได้แก่ 67,859, 116,769 และ 249,588 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเลขนัสเซิลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานระหว่างจำนวนกริด 116,769 และ 249,588 เท่ากับ 0.88% และ 0.45% ตามลำดับ ดังนั้นจึงใช้จำนวนกริด 116,769 ในการวิจัยครั้งนี้

#### 2.5 เงื่อนไขขอบเขต

- พิจารณาทางเข้าและทางออกเป็นแบบ periodic translation
- อุณหภูมิอากาศไหลเข้าที่ 300 K และมีค่าเลขพรานด์ เท่ากับ 0.7
- อากาศไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่
- รูปร่างความเร็วทางเข้าและทางออกเหมือนกัน
- กำหนดให้คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า
- เงื่อนไขขอบเขตไม่มีการสไลด์ที่ผิวท่อ หรือความเร็วที่ผิวท่อมีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นผิวท่อที่อยู่กับที่
- ผิวของท่อกลมมีฟลักซ์ความร้อนคงที่  $600 \text{ W/m}^2$
- ให้ตัวสร้างการไหลหมุนวนเป็นแผ่นบางและความร้อนไม่สามารถผ่านได้

### 3. ผลการจำลองและอภิปรายผล

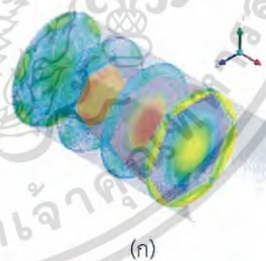
#### 3.1 พฤติกรรมการไหล

ลักษณะของการไหลในท่อกลมที่ติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนฐานพีระมิดที่อัตราส่วนความกว้างทางเข้าของพีระมิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลม  $D_{in} = 0.6$  และมีอัตราส่วนระยะพิทซ์  $P_r = 2$  วิเคราะห์การจำลองที่ค่า  $Re = 3,000 - 20,000$  จากรูปที่ 3 (ก) แสดงถึงโครงสร้างการไหลแนวขวางของอากาศที่ไหลผ่านท่อ

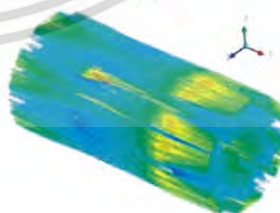
แลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนรูปทรงพีระมิดฐานหกเหลี่ยมไว้ภายใน จากรูปที่ 3 (ข) พบว่าการติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนส่งผลให้โครงสร้างการไหลตามแนวยาวของอากาศเกิดการปั่นป่วน และเกิดการหมุนวนของกระแส ส่งผลให้เกิดการกระแทกที่ผิวท่อและผนังของตัวสร้างการไหลหมุนวน ซึ่งการกระแทกที่ผนังของกระแสเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

#### 3.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

จากการไหลของของไหลในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน การกระจายของอุณหภูมิที่หน้าตัดขวางต่างๆ ในท่อเปล่า และท่อใส่พีระมิดมีลักษณะดังรูปที่ 4 (ก) และ(ข) เห็นได้ชัดว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำจะไหลอยู่บริเวณแนวแกนกลางท่อ ส่วนอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะไหลอยู่บริเวณใกล้ผิวท่อ กรณีติดตั้งพีระมิดจะมีชั้นขีดผิวของอุณหภูมิที่บางกว่าท่อเปล่า เนื่องจากอากาศที่ไหลผ่านพีระมิดช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนวนทำให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศเย็นกับอากาศร้อนที่ติดผนังท่อ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 5 (ก) และ (ข) แสดงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อ พบว่ากรณีใส่พีระมิดมีอุณหภูมิที่ผนังท่อต่ำกว่ากรณีท่อเปล่า เนื่องจากการไหลหมุนวนดูดอากาศร้อนบริเวณใกล้ผนังขึ้นมาผสมกับอากาศเย็นตรงกลางท่อ ทำให้ที่ผนังท่อที่มีอุณหภูมิที่เย็นกว่ากรณีท่อเปล่าซึ่งมีอุณหภูมิที่ผนังสูง

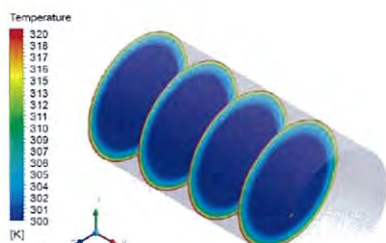


(ก)

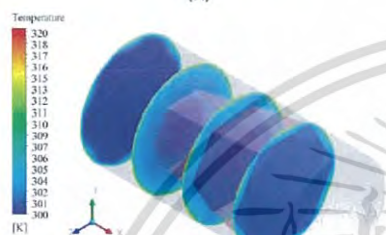


(ข)

รูปที่ 3 ลักษณะการไหล (ก) บนระนาบตัดขวาง และ (ข) ในแนวตามยาว กรณีติดตั้งพีระมิดฐานหกเหลี่ยม

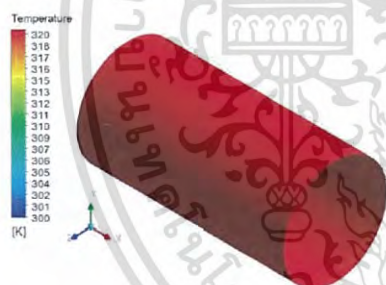


(ก)

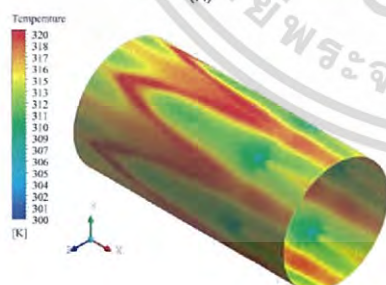


(ข)

รูปที่ 4 การกระจายอุณหภูมิที่ระนาบตัดขวาง (ก) ท่อเปล่า และ (ข) ท่อติดตั้งพีระมิดฐานหกเหลี่ยม



(ก)



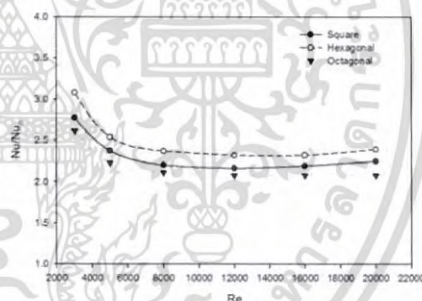
(ข)

รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวท่อ (ก) ท่อเปล่า และ (ข) ท่อติดตั้งพีระมิดฐานหกเหลี่ยม

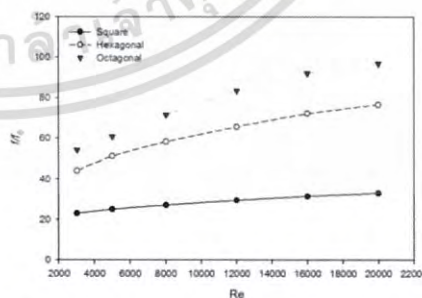
รูปที่ 6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนพีระมิดต่อท่อแลกเปลี่ยนความร้อนผิวเรียบกับเลขเรย์โนลด์ส พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง สำหรับตัวสร้างการไหลหมุนวนแบบพีระมิดฐานหกเหลี่ยมให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 3.08 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าที่  $Re = 3,000$

### 3.3 การสูญเสียความดัน

ค่าความสูญเสียความดันหรือค่าความดันตกคร่อมนั้นได้แสดงให้เห็นในรูปของอัตราส่วนของค่าตัวประกอบเสียดทานกรณีท่อติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนพีระมิดต่อค่าตัวประกอบเสียดทานท่อเปล่าระหว่างค่า  $Re$  ที่ 3,000 - 20,000 ดังรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อตัวสร้างการไหลหมุนวนพีระมิดมีจำนวนเหลี่ยมฐานมากขึ้น โดยพีระมิดฐานแปดเหลี่ยมให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากที่สุดที่  $Re = 20,000$  โดยมีค่าเท่ากับ 96.8 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า



รูปที่ 6 การแปรเปลี่ยน  $Nu/Nu_0$  กับ  $Re$  สำหรับพีระมิดฐานแบบต่างๆ



รูปที่ 7 การแปรเปลี่ยน  $f/f_0$  กับ  $Re$  สำหรับพีระมิดฐานแบบต่างๆ

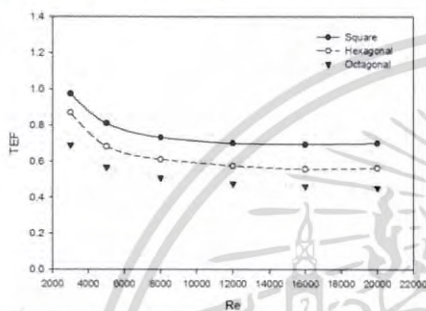
## CST0021

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



## 3.4 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนฐานพีระมิดรูปทรงต่างๆ พบว่าเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มต่อการลดลงของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่พิจารณา โดยตัวสร้างการไหลหมุนวนแบบฐานสี่เหลี่ยมให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดที่ 0.97 ที่  $Re = 3,000$  ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การแปรเปลี่ยน TEf กับ Re สำหรับพีระมิดฐานแบบต่างๆ

จากผลการจำลองที่ได้ยังให้สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี เนื่องจากเกิดค่าความดันตกคร่อมที่สูงขึ้นมากเมื่อติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนเข้าไป ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ได้จึงน้อย ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงรูปแบบตัวสร้างการไหลหมุนวนนี้ให้เกิดความดันตกคร่อมที่ลดลง โดยเลือกใช้ตัวสร้างการไหลหมุนวนแบบพีระมิดฐานหกเหลี่ยมที่มีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์มากที่สุดมาปรับปรุงโครงสร้างให้มีค่าตัวประกอบเสียดทานลดลง เพื่อคาดหวังให้ได้สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นกว่าเดิม รายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.5 ต่อไป

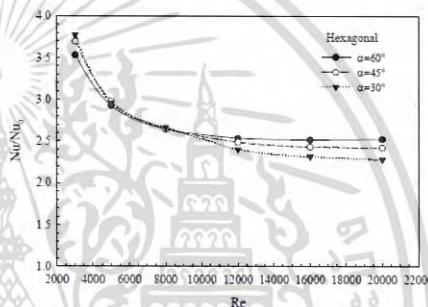
## 3.5 การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวสร้างการไหลหมุนวน

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนนี้จะทำการตัดปลายของพีระมิดฐานหกเหลี่ยมทำมุมกับแนวทิศทางการไหล ดังรูปที่ 9 โดยตัดทำมุม  $\alpha = 30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  ตามลำดับ เพื่อหามุมตัดที่ให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด ซึ่งผลที่ได้มีดังนี้



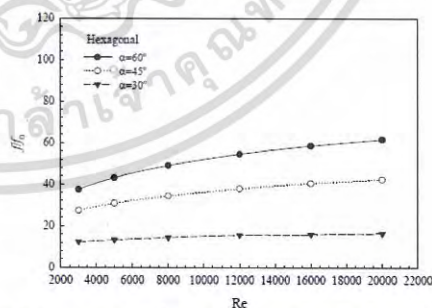
รูปที่ 9 พีระมิดฐานหกเหลี่ยมตัดปลาย

3.5.1 การถ่ายเทความร้อนที่ได้มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับแบบที่ไม่ได้ตัด โดยการตัดที่มุม  $\alpha = 30^\circ$  ที่  $Re = 3,000$  ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 3.77 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า ดังรูปที่ 10



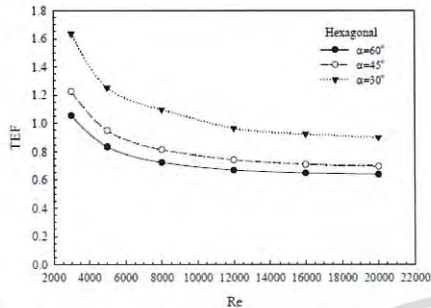
รูปที่ 10 การแปรเปลี่ยน  $Nu/Nu_0$  กับ Re สำหรับพีระมิดฐานหกเหลี่ยมที่มุมตัดต่างกัน

3.5.2 อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่ได้มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแบบที่ไม่ได้ตัด ซึ่งการตัดที่  $\alpha = 30^\circ$  ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุด โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 12.24-16.37 เท่าเทียบกับท่อเปล่า ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การแปรเปลี่ยน  $f/f_0$  กับ Re สำหรับพีระมิดฐานหกเหลี่ยมที่มุมตัดต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 การแปรเปลี่ยน TEF กับ Re สำหรับพีระมิดฐานหกเหลี่ยมที่มุมตัดต่างกัน

3.5.3 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ได้มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับแบบที่ไม่ได้ตัด โดยการตัดที่  $\alpha=30^\circ$  ให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.64-0.9 เท่าเทียบกับท่อเปล่า ดังรูปที่ 12 และมีแนวโน้มว่าหากยิ่งตัดให้มุมเหลือน้อยลงกว่าเดิม อาจจะเพิ่มสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้นกว่าเดิมได้อีก

#### 4. สรุปผลการจำลอง

##### 4.1 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปทรงพีระมิด

จากผลการจำลองเชิงตัวเลข เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนทรงพีระมิดหน้าตัดเสมอฐานรูปทรงสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม ที่  $Re=3,000 - 20,000$  พบว่าตัวสร้างการไหลหมุนวนพีระมิดจะช่วยให้เกิดการไหลหมุนวนของของไหล ซึ่งช่วยกระจายของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำไปสู่บริเวณผิวท่อมากขึ้น เป็นผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อเพิ่มมากขึ้น โดยแบบพีระมิดฐานหกเหลี่ยมให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 3.08 เท่าของท่อเปล่าที่  $Re=3,000$  และมีค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำสุดที่ 1.63 เท่าในกรณีติดตั้งพีระมิดแบบฐานสี่เหลี่ยมที่  $Re=20,000$  และจากการที่เกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลหมุนวนที่เพิ่มขึ้นมานั้น ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่แบบพีระมิดฐานแปดเหลี่ยมให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงสุดที่  $Re=20,000$  โดยมีค่าเท่ากับ 98.79 เท่าของท่อเปล่า และมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดที่ 8.6 เท่าของท่อเปล่า กรณีใช้พีระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่  $Re=3,000$  และพบว่า

พีระมิดฐานสี่เหลี่ยมให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดที่ 1.01 ที่ค่า  $Re=3,000$

##### 4.2 เมื่อปรับปรุงตัดทำมุมต่างๆ

ผลจากการจำลองเชิงตัวเลข เมื่อนำตัวสร้างการไหลหมุนวนพีระมิดฐานหกเหลี่ยมซึ่งให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงที่สุดเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ ไปตัดมุมที่ทางเข้า เพื่อเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้ดียิ่งขึ้น โดยการถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อกว้างที่สุดที่ 3.77 เท่าของท่อเปล่าที่  $Re=3,000$ ,  $\alpha=30^\circ$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงสุดที่ 61.62 เท่าของท่อเปล่าที่  $Re=20,000$ ,  $\alpha=60^\circ$  และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุด 1.64 เท่าของท่อเปล่าที่  $Re=3,000$ ,  $\alpha=30^\circ$  ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การตัดมุมของตัวประกอบเสียดทานให้ผลที่ดีกว่าแบบไม่ตัดมุม และมุมตัดที่  $\alpha=30^\circ$  ให้สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kongkai-paiboon, V., Nanan, K. and Eiamsa-ard, S. (2010). Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37(5), May 2010, pp. 568 – 574.
- [2] Promvongse, P. (2007). Heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts, *Energy Conversion and Management*, vol. 49(1), January 2008, pp. 8 – 15.
- [3] Durmus, A. (2004). Heat transfer and exergy loss in cut out conical turbulators, *Energy Convers*, vol. 45(5), March 2004, pp. 785 – 796.
- [4] Yakut, K. and Sahin, B. (2004). Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers, *Applied Energy*, vol. 78(3), July 2004, pp. 273 – 288.
- [5] Patankar, S.V., Liu, C.H. and Sparrow, E.M. (1977). Fully Developed Flow and Heat Transfer in Ducts Having Streamwise-Periodic Variations of Cross-Sectional Area, *Journal of Heat Transfer*, vol. 99(2), May 1977, pp. 180 – 186.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายราชันย์ พูลเพิ่ม
วัน เดือน ปีเกิด	1 มิถุนายน 2531
ที่อยู่	151 หมู่ 3 ตำบลเขาระบุก อำเภอยาง่าง จังหวัดเพชรบุรี รหัสไปรษณีย์ 76130
เบอร์โทร	087-1582093
ประวัติการศึกษา	2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2556-2559	ตำแหน่งวิศวกรพัฒนาและออกแบบผลิตภัณฑ์ บริษัทยูนิแอร์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด 69 ถนนกิ่งแก้ว ตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี สมุทรปราการ 10540
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	
พ.ศ.2559	งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30 (5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา) ในหัวข้อ การจำลองการไหลและ การถ่ายเทความร้อนในท่อที่ใส่พืระมิตปลายตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้