

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อที่ใส่แหวนกรวยวงรี

NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION IN A TUBE WITH ELLIPTICAL
CONICAL RING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2561
KMUTL-2018-EN-M-030-019

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อที่ใส่แหวนกรวยวงรี

NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION IN A TUBE WITH ELLIPTICAL
CONICAL RING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานหรือการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION IN A TUBE WITH ELLIPTICAL
CONICAL RING



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
2018

KMITL-2017-EN-M-030-019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

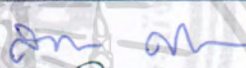


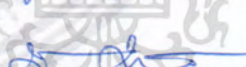
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการถ่ายความร้อนเชิงตัวเลขในท่อที่ใส่แหวนกรวยวงรี
Thesis Title Numerical Heat Transfer Investigation in a Tube with Elliptical Conical Ring
นักศึกษา นางสาวกณิดา ผลนิมิตร
รหัสประจำตัว 56601163
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-030-019

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์	
รศ.ดร.ชินรัชช์ เอียรพงษ์	
ผศ.ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย	
ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์	
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 เวลา 14.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 4 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมตัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อที่ใส่แหวนกรวยวงรี
นักศึกษา	นางสาวภณิดา ผลนิมิตร
รหัสนักศึกษา	56601163
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนในแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเป็นคาบที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์แล้วสามมิติของท่อกลมที่มีการใส่แหวนกรวยวงรี โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT การคำนวณยึดตามวิธีการปริมาตรสี่เหลี่ยมโดยใช้รูปแบบ SIMPLE สำหรับการเชื่อมโยงของค่าความดัน-ความเร็วและใช้กระบวนการวิธีแบบ QUICK สำหรับพจน์การพาในสมการหลัก แหวนกรวยวงรีตัดซึ่งตัดแปลงจากกรวยแบบดั้งเดิมโดยกรณีที่ (1) ทำการบีบอัดกรวยกลมให้เป็นกรวยวงรีแบบสมมาตร และ (2) ทำการตัดกรวยวงรีจากกึ่งกลางของปลายให้เอียงทำมุม (α) ต่างๆ กับแนวระนาบให้เป็นทรงรูปปลีหรือทรงเพชรเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดโดยสร้างการไหลหมุนควงและเป็นตัวเพิ่มความปั่นป่วนซึ่งช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อ แหวนกรวยวงรีที่ใช้ในกรณีแรกที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าสามค่า ($D_{Ri} = d_i/D_i = 0.5, 0.6$ และ 0.7), อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกสามค่า ($D_{Ro} = d_o/D_o = 0.94, 0.96$ และ 0.98) และอัตราส่วนความรีสี่ค่า ($\alpha_r = d_{minor}/d_{major} = 0.4, 0.6, 0.8$ และ 0.9) และที่อัตราส่วนระยะพิตซ์แตกต่างกันที่ ($PR = 1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0) โดยศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 3000 ถึง 20,000 ในท่อที่มีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ผลจากการศึกษาเสนอในรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในรูปแบบของเลขนัสเซิลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานตามลำดับ ผลจากการศึกษาเชิงตัวเลขพบว่ากรวยวงรีที่ติดตั้งในท่อกลมช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงมากเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ การจัดวางกรวยวงรีแบบกระจายตัวลู่ออก (diverging elliptical conical ring, DER) ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะความร้อนสูงกว่ากรวยวงรีแบบลู่ออก (converging elliptical conical ring, CER) โดยกรวยวงรีที่ $\alpha_r = 0.6, PR = 1.5, D_{Ri} = 0.6, D_{Ro} = 0.98$ ให้ค่าสมรรถนะที่สูงที่สุดประมาณ 1.19 ส่วนกรณีสองที่ทำการตัดกรวยวงรีพบว่ากรวยตัดทรงลิ้มเรียวยุค ($\alpha = 16.25^\circ$) ให้การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดในขณะที่ความดันตกคร่อมมีค่าลดลงน้อยที่สุดส่งผลให้ได้ค่าสมรรถนะที่สูงที่สุด (TEF) ประมาณ 2.4 ซึ่งดีกว่ากรวยวงรีทรงลิ้มเรียวยุคใส่กลับทิศและกรวยตัดทรงเพชรประมาณ 10% การใช้กรวยวงรีตัดทรงลิ้มไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน แต่ยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลงในกรณีที่ PR น้อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Numerical Heat Transfer Investigation in a Tube with Elliptical Conical Ring
Student	Miss Panida Ponimit
Student ID.	56601163
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

ABSTRACT

The thesis presents a numerical investigation on heat transfer characteristics in a 3D fully-developed periodical turbulent flow model of a circular tube fitted with elliptical conical rings using ANSYS FULENT for the simulation. The computations are based on a finite volume method with the SIMPLE algorithm for handling the pressure-velocity coupling and the QUICK scheme for the convection terms. The elliptical conical rings modified from the typical conical ring by two cases: (1) pressing the ring to be elliptical cone shape and (2) cutting the elliptical ring from the center of the ends at various inclination angles, (α) to form the wedge or diamond shapes used as a turbulator for producing the vortex flows to enhance the heat transfer rate in a tube. The elliptical conical rings in the first case have three inlet diameter ratios, ($D_{Ri} = d_i/D_i = 0.5, 0.6$ and 0.7); outlet diameter ratios, ($D_{Ro} = d_o/D_o = 0.94, 0.96$ and 0.98); four ellipticity ratios ($a_r = d_{minor}/d_{major} = 0.4, 0.6, 0.8$ and 0.9) and different pitch ratios, ($PR = 1.5, 2.0, 2.5$ and 3.0). The computation is conducted by varying the airflow rate for Reynolds number ranging from 3000 to 20,000 in the test tube having a constant surface heat flux. The effects of the ring insert on heat transfer and pressure drop are presented in terms of Nusselt number and friction factor, respectively. The numerical results show that the modified conical-ring insert provides higher heat transfer rate than the typical ring insert and the smooth tube alone, and also yields less friction factor than the typical one. The arrangement with diverging elliptical conical ring, DER gives higher thermal performance than that with converging elliptical conical ring, CER. The DER at $a_r = 0.6, PR = 1.5, D_{Ri} = 0.6$ and $D_{Ro} = 0.98$ yields the maximum thermal performance around 1.19. In the second case, it is found that the wedge-shaped DER ($\alpha = 16.25^\circ$) provides the highest heat transfer while the lowest pressure drop, leading to the maximum thermal performance (TEF) around 2.4, better than the reversed wedge-shape or the diamond shape inserts at about 10%. The use of the modified elliptical rings not only effects the increase in heat transfer rate, but also the decrease in friction loss, especially for the case of lower PR .

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อที่ใส่กรวยวงรีสำเร็จลุล่วงไปได้โดยความอนุเคราะห์สนับสนุนจาก รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ สมบัติ ทำานา ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการศึกษาวิจัยซึ่งเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆน้องๆ ผู้ร่วมงานจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆด้านที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ที่ทำให้กำลังใจและให้การสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนและทำวิจัยของผู้วิจัยมาโดยตลอด ได้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณในทุกประการที่ให้แก่งานวิจัยเรื่องนี้ไว้ ณ โอกาสนี้

ภณิดา ผลนิมิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ❗ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	3
1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 แนวทางการศึกษาวิจัย.....	12
บทที่ 3 สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	13
3.1 บทนำ.....	13
3.2 สมมติฐาน	13
3.3 สมการพื้นฐานและแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน.....	13
3.3.1 สมการควบคุม.....	14
3.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน	15
3.3.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$	15
3.3.2.2 การคู่ควบของความดันและความเร็ว	17
3.3.2.3 วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK.....	18
3.4 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น.....	19
3.4.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์ของไหล.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้อง IV อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 การไหลแบบราบเรียบหรือการไหลเป็นชั้นๆ (Laminar Flow) กับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)	19
3.4.3 การไหลในท่อกลม	20
3.4.4 ตัวประกอบความเสียดทาน	22
3.5 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน	23
3.5.1 วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน	23
3.5.2 สภาวะการถ่ายเทความร้อน	24
3.5.3 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน	24
3.5.4 การพาความร้อน	24
3.5.4.1 หลักการพื้นฐานของการพาความร้อน	24
3.5.4.2 ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน	25
3.5.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	25
3.5.4.4 ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน	26
3.6 การคำนวณการไหลแบบชั่วเป็นช่วง	26
3.6.1 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความเร็ว	27
3.6.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลชั่วเป็นช่วง	27
3.6.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลชั่วเป็นช่วง	27
3.6.2 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความร้อน	28
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์และขั้นตอนการศึกษา	29
4.1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา	29
4.2 รูปร่างของกรวยที่ใช้ในการศึกษา	29
4.2.1 แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม	29
4.2.2 ลักษณะการจัดวางของแหวนทรงกรวยแบบวงรี	31
4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา	34
4.4 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ	34
4.5 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม	35
4.6 วิธีการดำเนินการศึกษา	37
บทที่ 5 ผลการศึกษาเชิงตัวเลขและการอภิปรายผล	38
5.1 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข	38
5.1.1 เลขนัสเซิลท์	39
5.1.2 การตรวจสอบกระบวนการวิธี (scheme)	40
5.2 ผลการศึกษาเชิงตัวเลขของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม	41
5.2.1 อิทธิพลของการจัดวางที่มีผลต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.2 อิทธิพลของการจัดวางแหวนทรงกรวย	48
5.2.3 อิทธิพลของการปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างทางเข้าและทางออก	54
5.2.4 อิทธิพลของระยะพิตช์	62
5.2.5 อิทธิพลของมุมปะทะ	70
5.3 การอภิปรายผลงานวิจัย	97
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	98
6.1 สรุปผลการศึกษา	98
6.1.1 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส	98
6.1.2 อิทธิพลของระยะพิตช์และมุมปะทะ	98
6.1.3 อิทธิพลของรูปร่าง	98
6.1.4 อิทธิพลของการปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างทางเข้าและทางออก	54
6.2 ข้อเสนอแนะและการพัฒนางานวิจัย	98
เอกสารอ้างอิง	100
ภาคผนวก	102
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ	103
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	105
ประวัติผู้เขียน	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 จำนวนของกริดที่ใช้ในการทดสอบ.....	35
ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้อง **VII** ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.....	8
2.7 รูปทรงของแหวนสปริงทรงกรวย และรูปแบบการจัดวางแบบ DR, CR และ CDR.....	9
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.....	11
3.1 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ.....	18
3.2 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลผ่านผิวของวัตถุ.....	20
3.3 การไหลอย่างสมบูรณ์ภายในท่อกลม.....	21
3.4 ตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลแบบสมบูรณ์ในท่อกลม	22
3.5 รูปทรงเรขาคณิตที่เข้าเป็นช่วง	27
4.1 ลักษณะของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม.....	30
4.2 ลักษณะของรูปแบบแหวนทรงกรวยที่ปรับค่า (aspect ratio, ar).....	31
4.3 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อ ก. converging Elliptical ring, CER ข. diverging Elliptical ring, DER	32
4.4 ลักษณะของกรวยที่ปรับปรุงรูปร่างและรูปแบบการตัดที่แตกต่างกัน	33
4.5 ลักษณะกริดและขอบเขตการไหลของท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวย	35
4.6 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า Nu ที่ Re=6000	36
4.7 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า f ที่ Re=6000	36
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สและผลการทดลองของ Promvonge.....	39
5.2 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส และผลการทดลองของ Promvonge	40
5.3 เลขนัสเซิลท์จากกระบวนการวิธีต่างๆ และผลการทดลองของ Promvonge	41
5.4 ตัวประกอบเสียดทานที่กระบวนการวิธีต่างๆ และผลการทดลองของ Promvonge.....	41
5.5 ลักษณะของแหวนทรงกรวย (ก.) แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม (ข.) แหวนทรงกรวยวงรี.....	42
5.6 เส้นกระแสการไหล 2 มิติของแหวนทรงกรวย (ก.) แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม (ข.) แหวนทรงกรวยวงรี	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้อง VIII ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 เส้นกระแสการไหล 3 มิติที่ของแหวนทรงกรวย (ก.) แหวนทรงกรวยแบบตั้งเดิม (ข.) แหวนทรงกรวยวงรี.....	43
5.8 การกระจายอุณหภูมิบริเวณผนังท่อของแหวนทรงกรวย (ก.) แหวนทรงกรวยแบบตั้งเดิม (ข.) แหวนทรงกรวยวงรี.....	44
5.9 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบตั้งเดิมและแหวนทรงกรวยวงรี.....	45
5.10 ความสัมพันธ์อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบตั้งเดิมและแหวนทรงกรวยวงรี.....	45
5.11 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบตั้งเดิมและแหวนทรงกรวยวงรี.....	46
5.12 ความสัมพันธ์อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบตั้งเดิมและแหวนทรงกรวยวงรี.....	46
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบตั้งเดิมและแหวนทรงกรวยวงรี.....	47
5.14 ลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อ ก.converging Elliptical ring,CER ข.diverging Elliptical ring,DER.....	48
5.15 เส้นกระแสการไหล 2 มิติ และ 3 มิติสำหรับการจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อ ก.converging Elliptical ring,CER ข.diverging Elliptical ring,DER.....	49
5.16 การกระจายอุณหภูมิบริเวณผนังท่อสำหรับการจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อ ก.converging Elliptical ring,CER ข.diverging Elliptical ring,DER.....	50
5.17 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อ ที่การจัดวางแบบ CER และ DER.....	50
5.18 ความสัมพันธ์อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อ ที่การจัดวางแบบ CER และ DER.....	51
5.19 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อ ที่การจัดวางแบบ CER และ DER.....	52
5.20 ความสัมพันธ์อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อ ที่การจัดวางแบบ CER และ DER.....	52
5.21 ความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อ ที่การจัดวางแบบ CER และ DER.....	53
5.22 แสดงลักษณะของท่อกลมที่ติดตั้งแหวนกรวยที่ปรับค่า (aspect ratio, a_r).....	54
5.23 เส้นกระแสการไหลสองมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r = 0.4, 0.6, 0.8$ ที่ค่า $PR=1.5 Re=3000$	55
5.24 เส้นกระแสการไหลสามมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r = 0.4, 0.6, 0.8$ ที่ค่า $PR=1.5 Re=3000$	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้อง IX อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.25 คอนทัวร์การกระจายอุณหภูมิของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r = 0.4, 0.6, 0.8$ ที่ค่า $PR=1.5$ $Re=3000$	57
5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r = 0.4, 0.6, 0.8$ ที่ค่า $PR=1.5$ และ 2.0 $Re=3000$	58
5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r=0.4, 0.6$ และ 0.8 ที่ค่า $PR=1.5$ และ 2.0	59
5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r = 0.4, 0.6, 0.8$ ที่ค่า $PR=1.5$ และ 2.0 $Re=3000$	60
5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r = 0.4, 0.6, 0.8$ ที่ค่า $PR=1.5$ และ 2.0 $Re=3000$	60
5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r = 0.4, 0.6, 0.8$ ที่ค่า $PR=1.5, 2.0$	61
5.31 แสดงลักษณะของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวย.....	62
5.32 เส้นกระแสการไหลสองมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า (ก.) $PR=1.5$ (ข.) $PR=2.0$ และ (ค.) $PR=2.5$ ที่ค่า $a_r = 0.6$ ที่ $Re=3000$	63
5.33 คอนทัวร์การกระจายอุณหภูมิของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยเปลี่ยนค่า (ก.) $PR=1.5$ (ข.) $PR=2.0$ และ (ค.) $PR=2.5$ ที่ค่า $a_r = 0.6$ ที่ $Re=3000$	64
5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า (ก.) $PR=1.5$ (ข.) $PR=2.0$ และ (ค.) $PR=2.5$ ที่ค่า $a_r = 0.6$ ที่ $Re=3000 - 20000$	66
5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า $P_r=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ $Re=3000 - 20,000$	67
5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า $P_r=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ $Re=3000 - 20,000$	68
5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า $P_r=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ $Re=3000- 20,000$	68
5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า $P_r=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ $Re=3000 - 20,000$	69
5.39 ลักษณะของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงก.รูปทรงลิ้ม ข.รูปทรงลิ้มกลับทิศ ค.รูปทรงเพชร	70
5.40 ลักษณะของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 (ทรงรูปลิ้ม).....	71
5.41 เส้นกระแสการไหลสองมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 16.5^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ และ 30° ตามลำดับ	72
5.42 เส้นกระแสการไหลสามมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 16.5^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ และ 30° ตามลำดับ	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.43 คอนทิวรัของการกระจายอุณหภูมิของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 16.5^\circ, 20, 25^\circ$ และ 30° ตามลำดับ	75
5.44 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 (รูปทรงกลม)	76
5.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 (รูปทรงกลม)	77
5.46 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 (รูปทรงกลม)	78
5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 (รูปทรงกลม)	78
5.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 (รูปทรงกลม)	79
5.49 ลักษณะของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 (รูปทรงกลมกลับทิศ)	80
5.50 เส้นกระแสการไหลสองมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25° ตามลำดับ	81
5.51 เส้นกระแสการไหลสามมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25° ตามลำดับ	82
5.52 คอนทิวรัของการกระจายอุณหภูมิของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25° ตามลำดับ	83
5.53 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25°	84
5.54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25°	85
5.55 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25°	86
5.56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25°	86
5.57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25°	87
5.58 ลักษณะของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D ตามลำดับ	88
5.59 เส้นกระแสการไหลสองมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D ตามลำดับ	89
5.60 เส้นกระแสการไหลสามมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D ตามลำดับ	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.61	คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D ตามลำดับ92
5.62	ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัยสเกลกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D93
5.63	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัยสเกลกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวน ทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D94
5.64	ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D95
5.65	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) จารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D 95
5.66	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D 96

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	ความยาวของปีก, 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
b/D	อัตราส่วนความสูงปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
m	มวล, kg
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s
Nu	เลขนิตเชลท์เฉลี่ย
Nu_0	เลขนิตเชลท์ของท่อกลมผิวเรียบ
P	เส้นรอบรูป, m
p	ความดันสถิต, Pa
P_R	อัตราส่วนพิตช์
Pr	เลขพรานด์
q_s''	ฟลักซ์ความร้อนระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ, W/m^2
Q	เทอมการเพิ่มความร้อนทั้งหมดภายในโดเมน
Re	เลขเรย์โนลด์ส์
S_{ij}	เทนเซอร์ค่าเฉลี่ยของอัตราความเครียด, s^{-1}
T	อุณหภูมิ, K
T_s	อุณหภูมิผิว, K
T_∞	อุณหภูมิกระแสหลัก, K
DER	การจัดวางแหวนทรงกรวยแบบกระจายออก (diverging Elliptical ring)
CER	การจัดวางแหวนทรงกรวยแบบลู่เข้า (converging Elliptical ring)

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

Γ	สัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อน
α	มุมปะทะ
ϕ	ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อหน่วยมวล
μ	ความหนืดสัมบูรณ์, $N \cdot s / m^2$
ν	ปริมาตรจำเพาะ, m^3 / kg
γ	น้ำหนักจำเพาะ
ε	อัตราการสูญเสียของความปั่นป่วน, m^2 / s^3
ρ	ความหนาแน่น, kg / m^3
τ	ความเค้นเฉือน, N / m^2
σ	เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ

ตัวห้อย

0	ท่อผิวเรียบ (smooth duct)
a	อากาศ (air)
m	เฉลี่ย (mean)
w	ผนัง (wall)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้โลกมีการพัฒนา และเจริญก้าวหน้าเป็นอย่างมากและจะเห็นได้ว่าความต้องการพลังงานมีมากขึ้น เนื่องจากโลกมีความเจริญมากขึ้นทำให้มีการใช้พลังงานในปริมาณมากขึ้น จะเห็นได้ว่าอุตสาหกรรม ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์แบบหนึ่งที่สำคัญต่อวงการอุตสาหกรรมต่างๆ รวมทั้งงานด้านวิศวกรรม เช่น หม้อน้ำ คอนเดนเซอร์ อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่น้ำ หม้อน้ำรถยนต์ คอยล์ร้อน คอยล์เย็น ฯลฯ เหล่านี้เป็นตัวอย่างของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลร้อนกับของไหลเย็น ในส่วนของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆในสมัยนี้มีกระบวนการมากมายจนนับไม่ได้ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหล 2 ชนิดโดยไม่มีการผสมกันทางกายภาพเลย ซึ่งนักวิจัยส่วนมากพยายามที่จะหาวิธีเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการไหลภายในท่อให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้นการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบและตัวสร้างกระแสหมุนวนจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการไหลภายในท่อ

ซึ่งในปัจจุบันข้อจำกัดในส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยสำหรับการทดลองยังคงเป็นปัญหาสำหรับนักวิจัย เนื่องจากการทดลองต้องมีการลงทุนสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงระยะเวลาที่ใช้ในการวิจัยอีกด้วย รวมถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการทดลองที่ไม่สามารถบอกรายละเอียดได้ถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่ต้องการศึกษา ไม่ว่าจะเป็จุดที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิไม่เพียงพอ ค่าความละเอียดของอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการวัด ดังนั้นจากปัญหาข้างต้นจึงได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยโดยใช้หลักการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์หรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข เข้ามาช่วยในการอธิบายพฤติกรรมต่างๆ ของกระบวนการโดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ ในทางอุตสาหกรรม ได้มีนักวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาถึงเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนแบบแหวนทรงกรวยต่างๆภายในท่อกลมเพื่อสร้างการไหลหมุนวนของการไหลของอากาศภายในท่อ ซึ่งพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อน ความดันตกคร่อม และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ได้ โดยนำวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาใช้ในการศึกษาตัวแปรต่างๆภายในขอบเขตที่กำหนด ผ่านโปรแกรม Ansys FLUENT เพื่อความรวดเร็วและถูกต้องแม่นยำ ลดปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น และสามารถใช้เป็นแบบอย่างในการพัฒนางานวิจัยอื่นๆต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบตัวสร้างการหมุนวนภายในท่อกลมแบบกรวยวงรี
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหล การถ่ายเทความร้อน ความดันตกคร่อม และสมรรถนะเชิงความร้อนของของไหลภายในท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงแบบกรวยวงรีไว้ภายในเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของของอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก, มุมปะทะการไหล และระยะพิตช์ต่อพฤติกรรมกรวย การถ่ายเทความร้อน ความดันตกคร่อม และสมรรถนะเชิงความร้อนของของไหล โดยปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออกและปรับมุมปะทะการไหลที่มุมต่างๆของกรวยวงรีที่ติดตั้งภายในท่อกลม

4. เพื่อพัฒนารูปแบบของแหวนทรงกรวยวงรีในรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการลดค่าตัวประกอบเสียดทาน เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน นำไปสู่การเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้สูงขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ในการศึกษาจะใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล ผ่านการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Ansys FLUENT ซึ่งการถ่ายเทความร้อนอยู่บนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) โดยศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในรูปของเลขนัสเซลล์ท์และค่าตัวประกอบเสียดทาน

1.3.2. ศึกษาอิทธิพลของรูปแบบของแหวนทรงกรวยวงรีที่ติดตั้งภายในท่อกลม โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) = 0.05 m หรือเท่ากับ 50 mm ได้ทำการศึกษาแหวนทรงกรวย ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- แหวนทรงกรวยวงรีแบบดั้งเดิมที่อัตราส่วนความกว้างทางเข้า $D_{R_i}=0.6$, อัตราส่วนความกว้างทางออก $D_{R_o}=0.97$, อัตราส่วนระยะพิตช์ $P_R= 2.0$, อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, $a_r=1.0$)

- จากนั้นจึงปรับปรุงรูปแบบแหวนทรงกรวยโดยปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, a_r) เพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนให้ดียิ่งขึ้น

- ศึกษาอัตราส่วนความกว้างที่ทางเข้า $D_{R_i}=0.5, 0.6$, และ 0.7

- ศึกษาอัตราส่วนความกว้างที่ทางออก $D_{R_o}=0.94, 0.96$, และ 0.98

- ศึกษาอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, a_r) = $0.4, 0.6, 0.8$, และ 0.9

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

- ศึกษาอัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกท่อกลม (l_E / D) = $0.25D, 0.5D$ และ $0.75D$

1.3.3. ทารูปทรงของการปรับปรุงของแหวนทรงกรวยที่เหมาะสม ทั้งขนาดรูปร่าง อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก อัตราส่วนระยะพิตช์ มุมปะทะ เพื่อเปรียบเทียบค่าความดันตกคร่อม ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดจากการศึกษาในครั้งนี้ และหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งนำไปสู่การใช้งานจริง

1.3.4. ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ

1.3.5. ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$ model

1.3.6. ใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE ในกระบวนการคำนวณของความเร็วและความดันใช้การคำนวณแบบ QUICK ในเทอมของการพา

1.3.7. พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection)

1.3.8. ให้ความร้อนที่ผนังของท่อกลมแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ 600 W/m^2

1.3.9. กำหนดให้รูปทรงกรวยที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีลักษณะเป็นแผ่นบางและไม่สามารถนำความร้อนได้

1.3.10. ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทาน
ในช่วงเลขเรย์โนลด์ $Re = 3000 - 20000$

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต ที่มีความเกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหล โดยการติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนรูปแบบต่างๆภายในท่อกลม
2. ตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบและการตั้งค่าแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหล โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกับผลการทดลองของนักวิจัยในอดีตว่ามีความถูกต้องแม่นยำ เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจากแบบจำลองเชิงตัวเลขจะไม่ผิดพลาด
3. ออกแบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนพร้อมตัวสร้างการหมุนวนที่จะใช้ในการศึกษาจากการประยุกต์งานวิจัยในอดีต รวมทั้งตรวจสอบความถูกต้องที่จะใช้ในการศึกษา
4. คำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการไหลสามมิติ โดยเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ Re , a , α และ PR
5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขโดยเปรียบเทียบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนค่าตัวประกอบเสียดทาน ค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ด้วยการแสดงกราฟเปรียบเทียบ และแสดงในรูปแบบของคอนทัวร์อุณหภูมิ, กระแสการไหล 2 มิติ 3 มิติ
6. สรุปผลการศึกษาวิจัยและให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

1. ทราบถึงอิทธิพลของตัวสร้างการไหลหมุนวน ที่ส่งผลต่อสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน
2. เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น
3. ประหยัดเวลา ช่วยในการประหยัดพลังงาน และนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต

1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขของการไหลในท่อแบบปั่นป่วนผ่านกรวยวงรี” เล่มนี้ได้นำเสนอรายละเอียดของเนื้อหาออกเป็นทั้งหมด 6 บท โดยแต่ละบทประกอบด้วยรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้ **บทที่ 1 บทนำ** เป็นการกล่าวนำเพื่อให้เข้าใจถึงที่มาและความสำคัญของการวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่ผู้ทำวิจัยคาดหวังว่าจะได้รับจากการทำการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ **บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์** กล่าวถึงการนำเสนองานวิจัยต่างๆที่ผ่านมาที่ได้ทำการศึกษาถึงการติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนภายในท่อกลม โดยมีรูปแบบและลักษณะการจัดวางตัวสร้างการไหลหมุนวนในรูปแบบกรวยแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุง **บทที่ 3 สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง** ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆและสมการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และสมรรถนะเชิงความร้อน เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและทำความเข้าใจในการวิจัยครั้งนี้

บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์และขั้นตอนการศึกษา อธิบายรูปแบบการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมด้วยตัวสร้างการไหลหมุนวน รูปแบบต่างๆทำการศึกษาในครั้งนี้ โดยปรับเปลี่ยนค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, a) อัตราส่วนพิตซ์ (PR) และมุมปะทะ(α)ของตัวสร้างการไหลหมุนวน เพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน และเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน **บทที่ 5 ผลการศึกษาเชิงตัวเลขและการอภิปราย** นำเสนอผลที่ได้จากการศึกษาทั้งค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน เมื่อทำการใส่ตัวสร้างการไหลหมุนวนภายในท่อกลม **บทที่ 6 สรุปผล** สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ การสรุปผลจากการศึกษาทั้งหมดและข้อเสนอแนะต่างๆเพิ่มเติมในการต่อยอดงานวิจัยต่อไป ซึ่งจะถูกรวบรวมไว้ในบทสุดท้ายบทนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

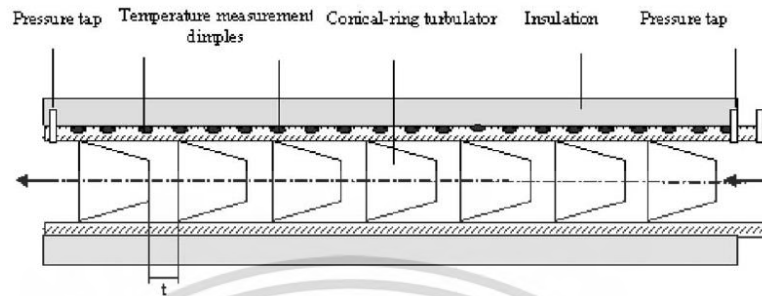
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่มีผู้ทำการวิจัยผ่านมาในอดีตที่ศึกษาเกี่ยวกับตัวสร้างการไหลหมุนวน ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของของไหลเพื่อพัฒนาไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการใส่ตัวสร้างการไหลหมุนวนในท่อกลมนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี ถึงแม้ว่าตัวสร้างการหมุนวนนี้จะช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น แต่ความต้านทานการไหลก็เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกันและเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องปรับปรุงแก้ไขอยู่เสมอ จึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษางานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาเพื่อที่จะนำข้อมูลในอดีตมาทำการวิจัยหาแนวทางในการปรับปรุงตัวสร้างการหมุนวนรูปแบบต่างๆ ในรูปแบบของแหวนทรงกรวย นี้ด้วยหลักการที่ถูกต้องและมีประสิทธิภาพ การแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในชีวิตประจำวันและในส่วนของภาคอุตสาหกรรม เช่น ระบบปรับอากาศในขบวนการผลิตต่างๆ ในภาคอุตสาหกรรม ระบบระบายความร้อนในรถยนต์ ซึ่งมีความสำคัญที่พัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในระบบระบายความร้อนในท่อกลมก็เป็นอีกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้รับการพัฒนามาโดยตลอด ซึ่งในปัจจุบันข้อจำกัดในส่วนของการใช้การศึกษาวิจัยสำหรับการทดลองยังคงเป็นปัญหาสำหรับนักวิจัย เนื่องจากการทดลองต้องมีการลงทุนสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงระยะเวลาที่ใช้ในการวิจัยอีกด้วย รวมถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการทดลองที่ไม่สามารถบอกรายละเอียดได้ถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่ต้องการศึกษา ไม่ว่าจะเป็นจุดที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิไม่เพียงพอ ค่าความละเอียดของอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการวัด ดังนั้น จากปัญหาข้างต้นจึงได้มีการทำการศึกษาวิจัยโดยใช้หลักการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์หรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข เข้ามาช่วยในการอธิบายพฤติกรรมต่างๆ ของกระบวนการโดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ ในทางอุตสาหกรรม ได้มีนักวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาถึงเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Patankar.(1977) และคณะ ได้ริเริ่มศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์การไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อตามแนวขวาง โดยจากการศึกษาพบว่า การไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์มีพฤติกรรมการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกันและซ้ำกันทุกๆ ช่วงของการไหล ซึ่งสามารถนำแนวความคิดนี้มาพัฒนาในการใช้แบบจำลองวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนต่างๆ ได้อย่างมากมาย

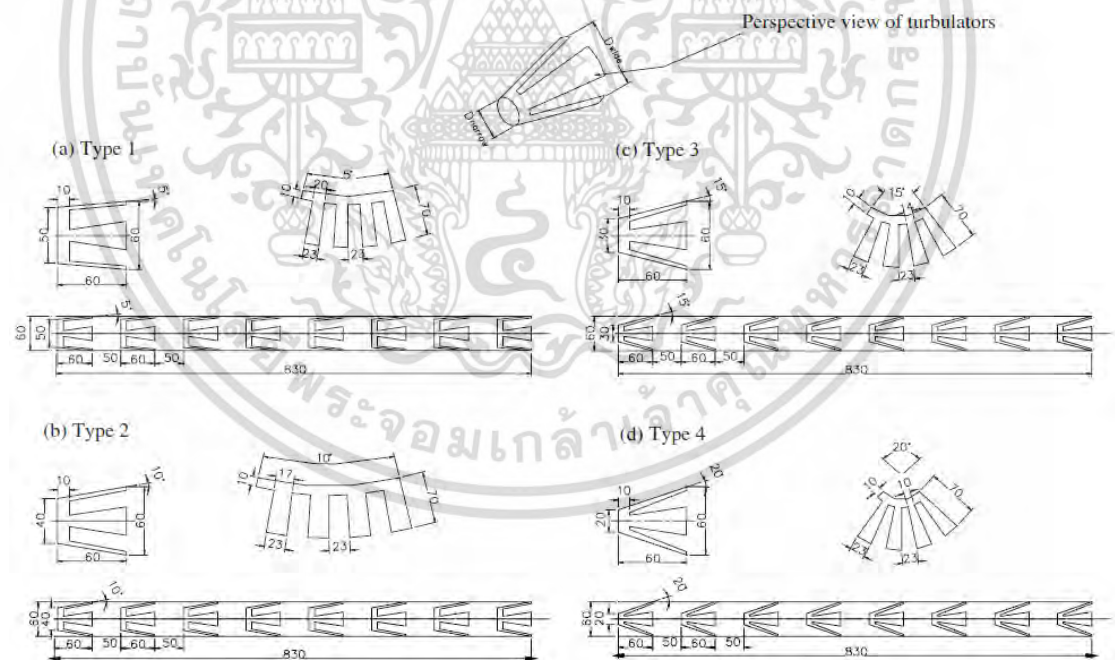
Yakut และ Sahin.(2004) ได้ศึกษาคุณลักษณะการสั่นเหนี่ยวนำการไหลของแหวนทรงกรวยที่ใช้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สนใจขึ้นในปี 2004 โดยการทดสอบออกแบบระยะพิทซ์ไว้ที่ 10, 20 และ 30 มม. และนำมาติดตั้งที่ภายในของกลุ่มท่อตั้งรูปที่ 2.1 โดยมีของไหลทดสอบเป็นอากาศไหลผ่านภายในท่อ

จากผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อติดตั้งแหวนทรงกรวยกับท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการไหลที่ปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าแต่ก็ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานที่สูงขึ้นเช่นกัน โดยปัจจัยที่ต้องพิจารณาต่อไปคือขนาดและน้ำหนักของแหวนทรงกรวยนี้เพื่อให้การใช้แหวนทรงกรวยนี้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [10]

Durmus.(2004) ได้ศึกษาถึงอิทธิกรตัดส่วนของแหวนทรงกรวยที่ติดตั้งอยู่ภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิผิวท่อคงที่ ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์ส 15,000-60,000 โดยนำผลของการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้มาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งแหวนทรงกรวย

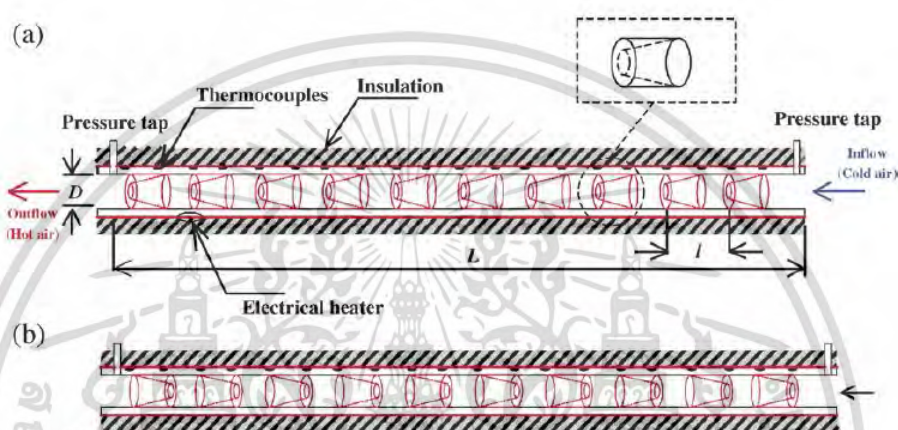


รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการตัดและขนาดของแหวนทรงกรวย [11]

เมื่อนำสมการมาใช้ในการวิเคราะห์ห้ผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าแหวนทรงกรวยมีความสัมพันธ์อย่างมากต่อค่าการถ่ายเทความร้อนที่มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการจัดวางตัวสร้างการไหลหมุนวนลงไปในพื้นที่การไหลของของไหลจะทำให้เกิดค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นสิ่งสำคัญที่ควรนำมาปรับเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการใช้งานคือค่าความดันตกคร่อม เนื่องจากค่าความดันตกคร่อมนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คร่อมที่เพิ่มขึ้นมาจะส่งผลให้ต้องใช้กำลังปั๊มที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปจะทำการศึกษาถึงผลกระทบของจำนวนตัวสร้างการไหลหมุนวนที่ติดตั้งในท่อร้อนไฟและท่อควันในหม้อน้ำ (boiler) ซึ่งเป็นส่วนของก๊าซที่มีความร้อนมาก

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



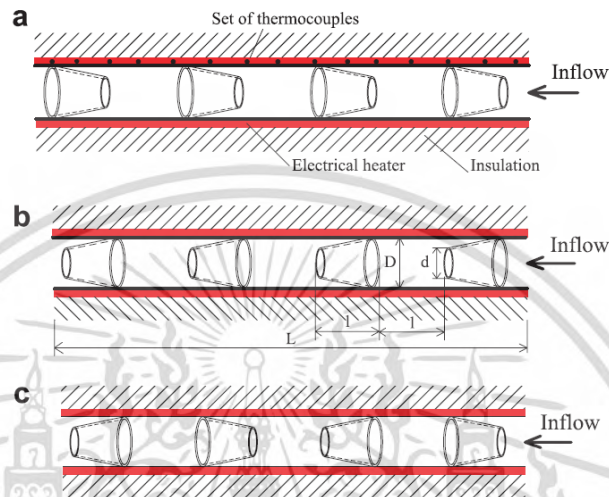
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวย (a) จัดวางแบบ C-nozzle และ (b) จัดวางแบบ D-nozzle [12]

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

Promvonge.(2008) 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 โดยให้ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อมีค่าคงที่

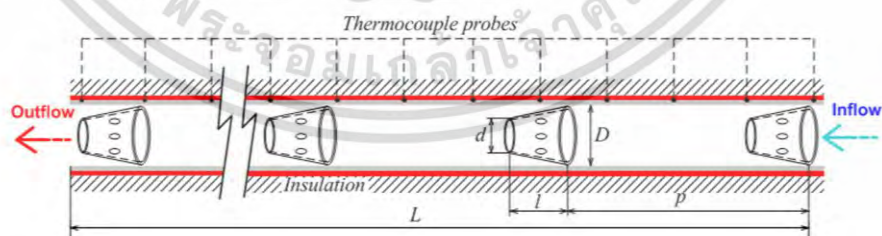
ผลการทดลองที่ได้จากการติดตั้งแหวนทรงกรวยไว้ภายในท่อกลม ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากการจัดวางแบบ DR, CDR และ CR ที่ $d/D = 0.7-0.5$ มีค่าเพิ่มมากขึ้น 197-333%, 138-234 และ 91-175% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยหากพิจารณาที่เลขเรย์โนลด์สค่าเดียวกันจะพบว่าทั้งเลขนัสเซลท์และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะลดลงเมื่อลดค่า 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]

Kongkaitpaiboon และคณะ(2010) ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบเจาะรู (Perforated conical-ring, PCR) ที่อัตราส่วนพิทช์ = 4, 6 และ 12 จำนวนรูที่เจาะ = 4, 6 และ 8 รู โดยทดลองที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์สระหว่าง 4,000-20,000 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบและกำหนดให้ฟลักซ์ความร้อนที่ผนังท่อกลมมีค่าคงที่



รูปที่ 2.5 แสดงการจัดวางแหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรูแบบตามกระแสการไหล [14]



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของแหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรู [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

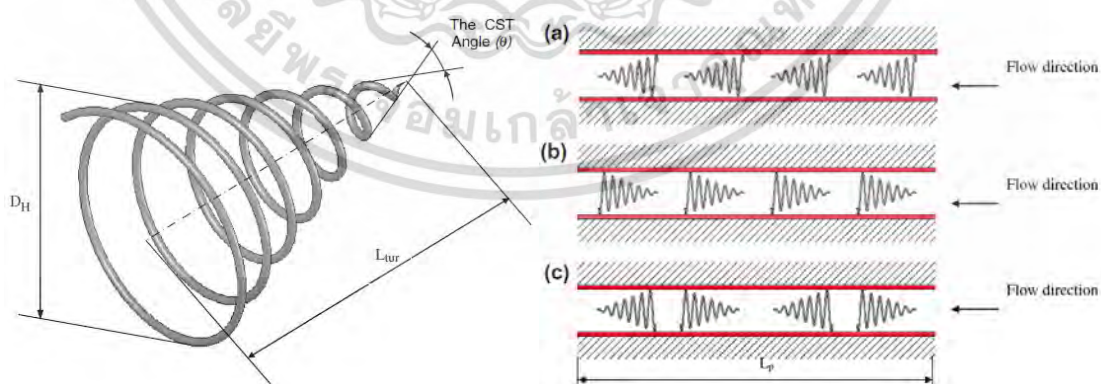
ผลการทดลองที่ได้จากการติดตั้งแหวนทรงกรวย PCR ในท่อกลมเมื่อเทียบกับแบบแหวนทรงกรวยปกติ CRs พบว่าที่สภาวะเดียวกันแหวนทรงกรวยแบบ PCRs ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่าแบบ CRs แต่ในขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกลับลดลงเหลือเพียง 25% ของแหวนแบบ CRs ซึ่งส่งผลให้แบบ PCRs ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบ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

อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแหวนทรงกรวยแบบ PCRs เพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดของอัตราส่วนพิตช์และจำนวนรูที่เจาะลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มของค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับจำนวนรูเจาะที่มากขึ้นและอัตราส่วนพิตช์ที่ลดลง

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

Anvari และคณะ(2011) ได้ศึกษาพฤติกรรมการพาแบบบังคับของน้ำในแนวตัดขวางกับท่อที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยไว้ภายในขึ้นในปี 2011 โดยมีการจัดวางแหวนทรงกรวยสองรูปแบบคือแบบลู่เข้าหรือ CR และแบบลู่ออกหรือ DR พบว่าการสอดใส่ตัวสร้างความปั่นป่วนภายในท่อสามารถเพิ่มค่าเลขนัสเซลท์ในการจัดวางแบบ DR ได้ถึง 521% และแบบ CR เพิ่มได้ 355% เมื่อเทียบกับแบบท่อที่ยังไม่เพิ่มตัวสร้างความปั่นป่วน แต่อย่างไรก็ตามความดันตกคร่อมได้เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยผู้วิจัยได้แนะนำเพิ่มเติมว่าการลดค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมานี้ควรใช้วิธีลดขนาดของตัวสร้างความปั่นป่วนมากกว่าที่จะเพิ่มกำลังปั๊มในการขับเคลื่อนของไหล

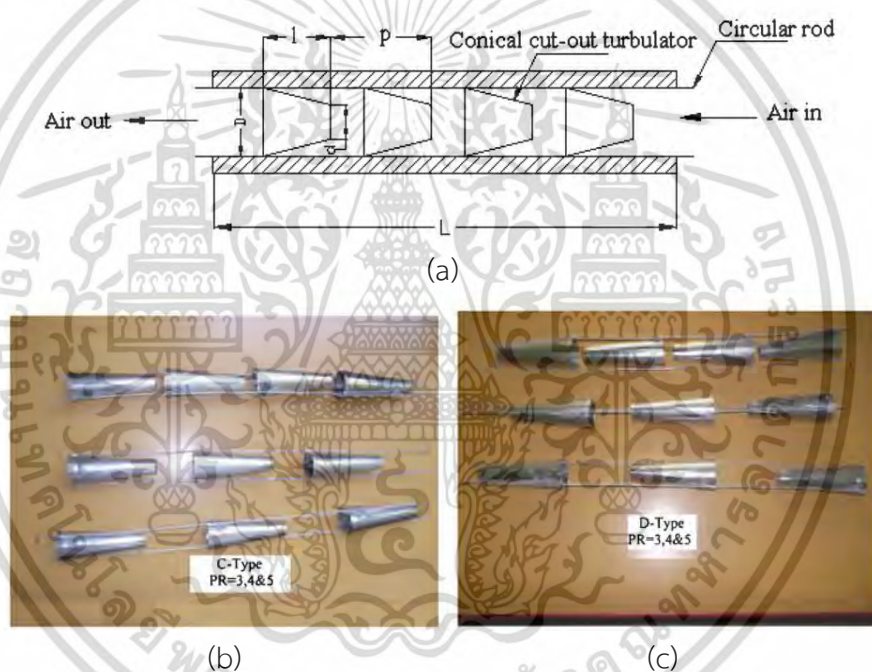
Durmus และ Karakaya.(2013) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงรูปแบบของแหวนทรงกรวยในรูปแบบของแหวนสปริงทรงกรวย (Conical spring turbulators, CST) โดยพิจารณาที่มุมของแหวนสปริงเท่ากับ 30, 45 และ 60 องศา ที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์ส 10,000-34,000 และมีการจัดวางรูปแบบของแหวนสปริงได้แก่แบบ DR, CR และ CDR ดังรูปที่ 2.7



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

Muthusamy และคณะ(2013) ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่ติดตั้งกรวยแบบมีครีบติดอยู่ด้านใน ที่อัตราส่วนพิตซ์เท่ากับ 3, 4 และ 5 โดยทดสอบที่การจัดวางสองรูปแบบคือแบบลู่เข้า (C-turbulators) และแบบลู่ออก (D-turbulators) มีอากาศเป็นของไหลทดสอบที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์สระหว่าง 6,800-9,700 ภายใต้ฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ 0.052 w/m^2 โดยเปรียบเทียบผลการทดลองจากท่อเปล่ากับการจัดวางแบบ C-turbulators และ D-turbulators



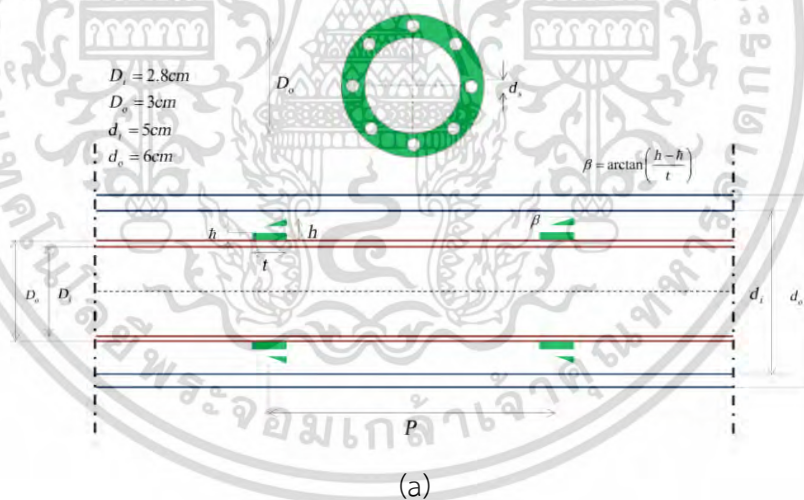
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวย (a) รูปแบบชุดทดลอง (b) จัดวางแบบ C-Type (c) จัดวางแบบ D-Type [17]

ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ได้จากการจัดวางแบบ C-Type และ D-Type ที่อัตราส่วนพิตซ์เท่ากับ 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 ที่อัตราส่วนพิตซ์เท่ากับ 3 มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนพิตซ์อื่นๆ

Anvari และคณะ(2014) ยังได้ศึกษาถึงอิทธิพลจำนวนแฉกของแหวนทรงกรวยเพื่อตรวจสอบถึงค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมภายในท่อกลมโดยที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่ โดยจัดวางแหวนทรงกรวยทั้งหมดสองรูปแบบได้แก่ แบบลู่เข้า (Converging conical ring, CR) และแบบลู่ออก (Diverging conical ring, DR) โดยการศึกษาเชิงตัวเลขครั้งนี้ใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่บเนื่องในการหาผลลัพธ์

ผลการศึกษาที่ได้พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่าผิวเรียบจะขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ส แต่ในกรณีศึกษาครั้งนี้ค่าตัวประกอบเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ส ค่าของเลขนัสเซลท์ที่ได้จากการทดลองจะแปรผกผันกับค่าเลขเรย์โนลด์ส รวมไปถึงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนก็ให้ผลลัพธ์ที่ผกผันกับเลขเรย์โนลด์สเช่นกัน โดยค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากการจัดวางแบบ DR ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการจัดวางแบบ CR แต่ว่าทั้งสองกรณีกลับให้ผลของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่น้อยกว่าแบบดั้งเดิม

Sheikholeslami และคณะ(2016) ได้ศึกษาอิทธิพลของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมและแบบเจาะรูที่มีผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนของอากาศที่มีต่อน้ำในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Double pipe heat exchanger) ที่มีการจัดวางแหวนทรงกรวยสองรูปแบบคือแบบ Direct conical ring, DCR และแบบ Reverse conical ring, RCR โดยทดลองที่อัตราส่วนของพื้นที่เปิด 0-0.0833 ช่วงของเลขเรย์โนลด์สระหว่าง 6,000-12,000 มุมของแหวนทรงกรวยตั้งแต่ 0-30 องศา และอัตราส่วนพิทซ์ 1.83-5.83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)



(d)

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

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการใส่แหวนทรงกรวยที่เจาะรูในชุดทดลองนั้นสามารถลดชั้นของความร้อนที่ผิวท่อให้บางลงได้ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเพิ่มของค่าเลขนัสเซิลท์ และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนพื้นที่เปิดเพิ่มมากขึ้น อัตราส่วนพิทช์ที่ต่ำๆ และเลขเรย์โนลด์สสูงๆ และยังพบว่าการจัดวางแบบ DCR จะให้ผลของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากขึ้นเมื่อเพิ่มมุมของแหวนทรงกรวยแต่การจัดวางแบบ RCR จะให้ผลที่ตรงข้ามกัน

2.3 แนวทางการศึกษาวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าการติดตั้งแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถสร้างการไหลหมุนวนให้แก่การไหลได้ ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบซี่ทวนกระแสการไหลให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการจัดวางแหวนทรงกรวยในแบบอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามการติดตั้งแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมยังทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ได้จึงไม่สูงนัก จึงเป็นสาเหตุหลักในงานวิจัยนี้โดยทำการปรับปรุงรูปแบบของแหวนทรงกรวยให้เป็นแหวนทรงกรวยวงรีและมีการปรับปรุงรูปร่างแบบอื่นๆ เพื่อเป็นการลดค่าความดันตกคร่อมลง

ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการทดลองครั้งนี้ โดยทำการปรับปรุงทำมุมปะทะของแหวนทรงกรวยวงรีเพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทาน เพิ่มการกระจายการไหลและการถ่ายเทความร้อนของของไหลให้มากขึ้น ปรับอัตราส่วนระยะความสูงต่อความกว้าง (aspect ratio) ทั้งด้านทางเข้าและทางออก รวมถึงระยะพิทช์ การตัดทำมุมปะทะที่ตัวแหวนทรงกรวย และอัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อกลม เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของของไหลสูงที่สุดและเป็นการขยายข้อมูลในการศึกษาท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยวงรี และเพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้ใช้งานในการตัดสินใจเลือกใช้ตัวสร้างการไหลหมุนวนได้ตามความเหมาะสม เป็นประโยชน์ในเชิงการเพิ่มองค์ความรู้ใหม่และเป็นข้อมูลเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีต่อไปในอนาคตสำหรับผู้สนใจออกแบบปรับปรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำไปสู่การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดการสูญเสียให้น้อยที่สุด งานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจทั่วไปรวมถึงภาคอุตสาหกรรม ทำให้การใช้พลังงานและทรัพยากรมีความคุ้มค่า มีประสิทธิภาพสามารถลดต้นทุนในการผลิตในด้านอุตสาหกรรม ซึ่งจะเป็นประโยชน์โดยตรงในเชิงเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการต่างๆที่ใช้ในการคำนวณและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยพิจารณาที่ ค่าการถ่ายเทความร้อน, ค่าความดันตกคร่อม, ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของของไหล ภายในท่อกลม และวิเคราะห์ผลลัพธ์รวมถึงปัญหาที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมหรือไฟไนท์วอลุ่ม (finite volume) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับใช้กันมากในปัจจุบัน สามารถนำมาใช้ในการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนในโดเมนที่มีลักษณะซับซ้อนได้และมีความแม่นยำ อีกทั้งยังนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างไม่ยุ่งยากและแสดงผลได้หลากหลาย

3.2 สมมุติฐาน

จากการวิจัยได้ศึกษาโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) โดยมีสมมุติฐานในการศึกษาดังนี้

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

3.3 สมการพื้นฐานและแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือสำหรับใช้ช่วยแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในการคำนวณ เพื่อประมาณผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อนและมีความยุ่งยากในการหาผลเฉลยด้วยวิธีแมนตรง หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับสมการควบคุม ซึ่งสมการควบคุมพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการโมเมนตัม (Momentum Equation) และสมการพลังงาน (Energy Equation) สมการดังกล่าวสามารถบ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพของของไหลและสิ่งต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการไหล และสมการควบคุมที่ได้จะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประมาณผลเฉลยของสมการอนุพันธ์สำหรับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้นิยมกันทั่วไปคือ ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume) มาช่วยในการหาคำตอบและอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 สมการควบคุม

สำหรับการไหลภายในท่อกลมจะประกอบไปด้วยสมการควบคุมต่างๆ ได้แก่ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน สามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนที่สถานะคงตัว (steady state) ได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

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

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (3.2)$$

สมการพลังงาน

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

เมื่อ $\Gamma = \mu / \text{Pr}$ และ $\Gamma_r = \frac{\mu_r}{\text{Pr}_r}$ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อนทางโมเลกุลและสัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อนปั่นป่วน ตามลำดับ

สมการ (3.1) และ (3.2) เรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ส (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation, RANS) จะสังเกตได้ว่าสมการที่ได้นี้มีรูปแบบคล้ายคลึงกับสมการนาเวียร์-สโตคส์แบบปกติ เพียงแต่มีเทอมของค่าความเค้นของเรย์โนลด์ส (Reynolds Stress) $\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i u_j})$ เพิ่มเข้ามาในสมการ ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วนนั่นเอง

เมื่อทำการเฉลี่ยปริมาณใดๆ ในสมการควบคุมตลอดช่วงเวลาช่วงหนึ่งของการไหลและของไหล จะทำให้เกิดตัวแปรขึ้นมาใหม่และส่งผลให้มีจำนวนตัวแปรไม่รู้ค่ามีจำนวนมากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ ซึ่งก็คือเทอมความเค้นของเรย์โนลด์สที่เพิ่มมานั่นเอง ทำให้ไม่สามารถหาผลลัพธ์ที่ต้องการได้ จึงจำเป็นต้องอาศัยสมการของแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) เข้ามาช่วยหาคำตอบเพื่อทำให้การแก้ปัญหามีความถูกต้องในระดับที่พอเพียงและครอบคลุมปัญหาความปั่นป่วนได้ ซึ่งจะได้กล่าวถึงแบบจำลองนี้ในหัวข้อต่อไป

3.3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน

การหาผลเฉลยสมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ส (RANS) นั้น จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนมาช่วยในการคำนวณเพื่อหาค่าความเค้นของเรย์โนลด์สที่การคำนวณแบบปกติไม่สามารถทำได้ ซึ่งการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนนี้จะช่วยให้ไม่ต้องหาค่าของการกระเพื่อมแต่จะสนใจเฉพาะส่วนของค่าเฉลี่ยเท่านั้น สำหรับการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับพฤติกรรมกรไหลที่เกิดขึ้นจึงจะสามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำ 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

3.3.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \varepsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิดนี้มี 3 แบบคือ standard, RNG และ Realizable โดยที่แต่ละแบบจะมีสมการเหมือนกัน k ต่างกันตรงสมการ ε ซึ่งในแต่ละแบบจะมีการกำหนดตัวแปรและค่าคงที่ที่ต่างกันไป

สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (turbulent kinetic energy equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.4)$$

โดยที่ค่า k คือ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, ε คือ อัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, G_k คือ ค่าพจน์การผลิตของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน โดยค่าพจน์การผลิตของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.5)$$

ซึ่ง $\overline{u'_i u'_j}$ คือ ค่าความเค้นเรย์โนลด์สในแบบจำลองเชิงเส้นนี้จะใช้ค่าความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นของ Boussinesq [3] และค่าความหนืดหมุนวน (eddy viscosity) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

สมการอัตราการแพร่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (dissipation rate equation)

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ model

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.7)$$

ค่าคงที่ต่างๆ ภายในสมการมีค่าดังนี้

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

แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \varepsilon$ model

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2}^* \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} \quad (3.8)$$

$$C_{\varepsilon 2}^* \equiv C_{\varepsilon 2} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$$

$$\eta = Sk/\varepsilon$$

ค่าคงที่ต่างๆ ภายในสมการมีค่าดังนี้

$$\eta_0 = 4.38, \beta = 0.012, C_{\varepsilon 1} = 1.42, C_{\varepsilon 2} = 1.68 \text{ และ } C_\mu = 0.00845$$

แบบจำลอง RNG $k - \varepsilon$ เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากแบบจำลอง $k - \varepsilon$ มาตรฐาน โดยมีความแตกต่างจากแบบมาตรฐานคือ แบบจำลอง RNG $k - \varepsilon$ ได้รวมเอารูปแบบความหนืดปั่นป่วนและสมการการเคลื่อนย้ายของอัตราการกระจาย ε แบบใหม่ ซึ่งได้มาจากสมการผลเฉลยแม่นยำสำหรับการเคลื่อนย้ายของการผันแปรความเร็วเฉลี่ย โดยเหมาะกับการนำมาใช้ในการไหลแบบหมุนวน (swirling flow) RNG $k - \varepsilon$ มาใช้วิเคราะห์การไหลในงานวิจัยนี้จึงมีความน่าเชื่อถือกว่าแบบจำลอง $k - \varepsilon$ มาตรฐาน

แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k - \varepsilon$ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{V \varepsilon}} \quad (3.10)$$

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

โดย G_k คือการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ย, C_1 และ C_2 คือค่าคงที่, σ_k และ σ_ε คือเลขพารามิเตอร์ปั่นป่วนสำหรับ k และ ε ตามลำดับ, S_k และ S_ε คือซอกเทอม

ตัวแปร k ในสมการ (3.9) คือสมการเดียวกันกับแบบจำลอง $k - \varepsilon$ มาตรฐาน ยกเว้นค่าคงที่ที่ตัวแปร ε ในสมการ (3.10) จะแตกต่างจากแบบจำลองมาตรฐานออกไป เนื่องจากเทอมของการสร้าง ε ของ Realizable นี้ไม่เกี่ยวข้องกับการสร้างค่า k โดยจะเห็นว่าไม่มีเทอม G_k อยู่ในสมการดังเช่นแบบจำลอง $k - \varepsilon$ อื่นๆ

สำหรับค่าความหนืดปั่นป่วน μ_t สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\mu_t = \rho C_\mu (k^2 / \varepsilon) \quad (3.11)$$

เมื่อ C_μ คือค่าคงที่ สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$C_\mu = (A_0 + A_3 k U^* / \varepsilon)^{-1} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \Omega_{ij}\Omega_{ij}} \quad (3.13)$$

โดย $A_0 = 4.04$ และค่าคงที่ A_s สามารถหาได้จาก

$$A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (3.14)$$

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

ซึ่งค่าคงที่ C_1 , C_2 , σ_k และ σ_ε สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\varepsilon$ ถูกกำหนดให้มีค่าดังนี้

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

3.3.2.2 การคู่ควบของความดันและความเร็ว

ในการคำนวณเชิงตัวเลขของพลศาสตร์ของไหลจำเป็นต้องมีกระบวนการวิธีต่างๆ เข้ามาช่วยหาค่าของสนามความดัน โดยงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) เข้ามาช่วยในการหาค่าตอบ ซึ่งในกระบวนการวิธีนี้จะเริ่มต้นจากการหาค่าของสนามความดันและทำการหาค่าตอบของสมการโมเมนตัมและสมการค่าแก๊ของสนามความดัน เมื่อได้ค่าดังกล่าวแล้วจึงนำมาปรับปรุงค่าของสนามความดันและสนามความเร็วที่ได้ นำค่าสนามความเร็วและสนามความดันที่ได้ใหม่นั้นป้อนสู่สมการโมเมนตัมและสมการค่าแก๊ของสนามความดันอีกครั้ง และทำซ้ำต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าตอบทั้งหมดลู่เข้าก็จะได้ค่าสนามความดันและสนามความเร็วที่เป็นไปตามกฎการเคลื่อนย้ายมวลและกฎการอนุรักษ์มวล

กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE นั้น จะเริ่มจากการหาค่าสนามความดัน p^* ตลอดช่วงโดเมนการไหล จากนั้นจึงทำการหาฟลักซ์ที่ผิว J_f^* ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$J_f^* = j_f^* + d_f (P_{c0}^* - P_{c1}^*) \quad (3.15)$$

หากไม่สอดคล้องกับสมการต่อเนื่อง จะดำเนินการแก้ไขโดยการนิยามเทอม J_f' ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าฟลักซ์ที่ผิวที่ถูกต้องกับค่าฟลักซ์ที่หามาแล้ว แสดงได้ดังนี้

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad (3.16)$$

เพื่อให้สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องนั้น กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE จะตั้งสมมติฐานเทอมของ J_f' ดังนี้

$$J_f' = d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.17)$$

เมื่อ p' คือค่าแก๊ของสนามความดัน

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

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเทอมของแหล่งกำเนิด b คืออัตราการไหลสุทธิเข้าสู่เซลล์ย่อย ดังสมการ

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f \quad (3.19)$$

สมการค่าแก้ของความดัน p' สามารถเขียนได้โดยใช้ระเบียบวิธีการทำซ้ำ และเมื่อได้ค่าของผลเฉลยแล้ว ค่าความดันและฟลักซ์ที่ผิวของเซลล์ที่ถูกต้องคือ

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (3.20)$$

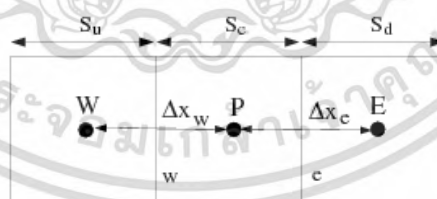
$$J_f = J_f^* + d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.21)$$

โดยค่า α_p คือตัวประกอบภายใต้ความผ่อนคลาย (under-relaxation) สำหรับความดัน

3.3.2.3 วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK

วิธีการประมาณค่า scheme แบบ QUICK (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) ใช้ในการคำนวณหาค่าที่ผิวเซลล์ ϕ_f ซึ่งมีอันดับของความแม่นยำที่สูงขึ้น โดยใช้พื้นฐานของการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของวิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับสอง (Second order upwind) ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรที่ศูนย์กลาง สำหรับผิวเซลล์ e ดังรูปที่ 3.1 หากมีการไหลจากทิศทางซ้ายไปขวา ค่าที่ผิวเซลล์ e สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_p + \frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_p - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_w \right] \quad (3.22)$$



รูปที่ 3.1 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ

เมื่อค่า $\theta=1$ สมการที่ (3.22) จะกลายเป็นสมการประมาณค่าในช่วงที่ศูนย์กลางอันดับสอง (central second order interpolation) ในขณะที่ $\theta=0$ จะได้สมการของการประมาณต้นลมอันดับสอง แต่โดยทั่วไปแล้วการประมาณค่าแบบ QUICK จะกำหนดให้ $\theta=1/8$

3.4 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น

การศึกษากลศาสตร์ของไหลมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อชีวิตประจำวัน รวมถึงในทางพัฒนาเชิงอุตสาหกรรมด้วย ไม่ว่าจะเป็นเครื่องอำนวยความสะดวก เครื่องมือเครื่องใช้และเครื่องจักรต่างๆ รวมถึงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมนั้น จะเห็นได้ชัดว่าล้วนประกอบไปด้วยการใช้งานของไหลแทบทั้งสิ้น เช่นระบบปรับอากาศ ระบบระบายน้ำและอากาศ อุตสาหกรรมผลิตอาหาร เป็นต้น ดังนั้นพื้นฐานความรู้ในวิชากลศาสตร์ของไหลจึงมีความจำเป็นสำหรับการคำนวณการออกแบบและประยุกต์ระบบเพื่อให้มีการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

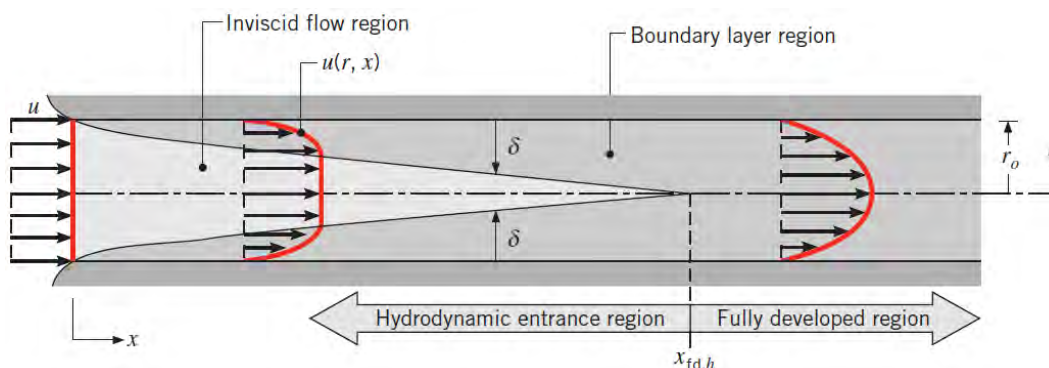
3.4.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์ของไหล

ของไหล (Fluid) หมายถึงของเหลวและก๊าซ ในการวิเคราะห์จะต่างกันตรงที่ก๊าซจะเป็นของไหลที่สามารถอัดตัวได้ ส่วนของเหลวนั้นไม่สามารถอัดตัวได้ ถึงแม้จะอัดตัวได้บ้างแต่ต้องใช้ความดันสูงมาก จึงพิจารณาว่าของเหลวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ของไหลอัดตัวได้คือของไหลที่ความหนาแน่นไม่คงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด เช่น ก๊าซอยู่ในภาชนะปิดสนิทเมื่อได้รับความร้อน ความหนาแน่นของก๊าซจะเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามถ้าสูญเสียความร้อนความหนาแน่นจะลดลง ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะของไหลที่อัดตัวไม่ได้เท่านั้น

- ความหนาแน่น (Density, ρ) คือ มวล (m) ของสารนั้นๆ หารด้วยปริมาตร (V)
- ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume, v) คือ ปริมาตรของสารนั้นๆ หารด้วยมวล ซึ่งจะมีค่าเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น
- ความหนืด (Viscosity, μ) คือ คุณสมบัติการต้านการเคลื่อนที่ของของไหล
- น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight, γ) คือ ความหนาแน่นคูณกับค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) หรือน้ำหนัก (mg) หารด้วยปริมาตร

3.4.2 การไหลแบบราบเรียบหรือการไหลเป็นชั้นๆ (Laminar Flow) กับ การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

พิจารณาการไหลแบบราบเรียบในท่อกลมที่มีรัศมีคือ r_0 ดังรูปที่ 3.2 เมื่อของไหลไหลเข้าสู่ท่อกลมด้วยความเร็วในรูปแบบที่เหมือนกันตลอดหน้าตัดขวางการไหล จะเกิดความหนืดระหว่างของไหลที่สัมผัสกับผิวของท่อ และขอบเขตของการไหลจะปรับเปลี่ยนไปตามระยะ x ที่เพิ่มขึ้น การปรับเปลี่ยนนี้เกิดขึ้นจากพื้นที่การไหลที่มีความหนืดน้อยลง และรวมเข้ากับเส้นศูนย์กลางในที่สุด ดังรูปที่ 3.2 และจากการรวมเข้ากันกับเส้นศูนย์กลางนี้ทำให้ผลกระทบจากความหนืดและรูปแบบของความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะ x หรือสามารถตัดผลกระทบจากความหนืดทิ้งไปได้



รูปที่ 3.2 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลผ่านผิวของวัตถุ [18]

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

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (3.23)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วในการไหล L คือ ความยาวตลอดช่วงการไหล และ ν คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลนศาสตร์

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

3.4.3 การไหลในท่อกลม

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

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (3.24)$$

อนึ่งค่า ρV [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] จะเป็นค่าการไหลของมวลสารต่อพื้นที่หน้าตัดในการไหล สำหรับในกรณีของก๊าซนั้น การเพิ่มความร้อนภายในท่อจะทำให้ก๊าซขยายตัวมีความเร็ว V เพิ่มขึ้น ค่า ρV จะไม่เปลี่ยนแปลงถ้าพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่ นอกจากนั้นโดยปกติจะถือว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด μ

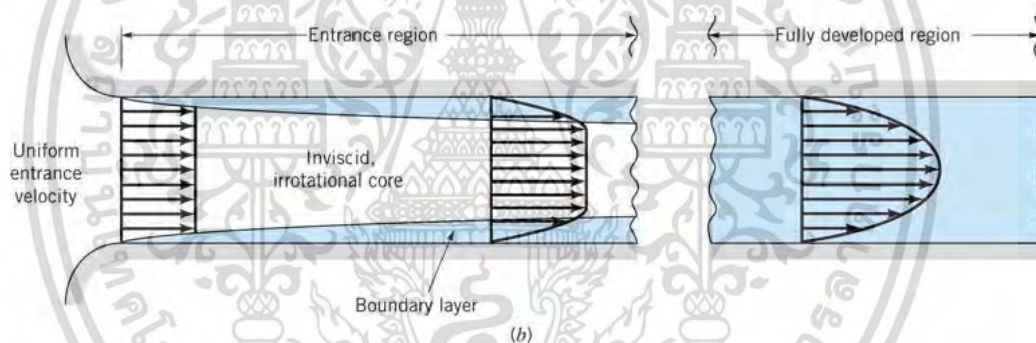
จะไม่เปลี่ยนแปลงไปกับความดันอีกด้วย ส่วนค่าความหนืดเชิงจลนศาสตร์ ν ซึ่งเท่ากับ μ / ρ ในกรณีของก๊าซจะเป็นค่าที่ผกผันกับความดันซึ่งจะต้องระมัดระวัง

เมื่อ D คือความยาวบ่งบอกลักษณะของช่องทางไหลหรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) มีนิยามเป็น

$$D = \frac{4A_c}{P} \quad (3.25)$$

เมื่อค่า A_c และ P เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของหน้าตัดตามลำดับ

เลขเรย์โนลด์สวิกฤติ Re_c ของการไหลภายในท่อที่ได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์แล้ว คือค่าเลขเรย์โนลด์สที่การไหลเปลี่ยนจากการไหลราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่า $Re_c = 2,300$ หรืออยู่ในช่วงระหว่าง 2,000 – 4,000 โดยประมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนในการไหล ความขรุขระภายในท่อที่ไหล หรือรูปทรง และสภาพของทางเข้า ส่วนเลขเรย์โนลด์สที่ต่ำกว่า 2,000 ไม่ว่าท่อจะมีความยาวมากเพียงใด การไหลก็จะไม่เปลี่ยนแปลงไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน จะยังคงรักษาสภาพการไหลแบบเป็นชั้น หรือราบเรียบต่อไป โดยรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นการกระจายความเร็วที่ได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์การกระจายความเร็วจะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ



รูปที่ 3.3 การไหลอย่างสมบูรณ์ภายในท่อกลม

โดยทั่วไปสำหรับการไหลในท่อผิวเรียบ เลขเรย์โนลด์สวิกฤติของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_D > 4,000$ และความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวเข้าสู่ช่วงสมบูรณ์หาได้จากสมการ

$$\left(\frac{L_e}{D} \right)_{turb} \approx 4.4 Re_D^{1/6} \quad (3.25)$$

3.4.4 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทาน (friction factor) ของ Moody หรือ Darcy ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติ มีนิยามว่า

$$f_{Darcy} \equiv \frac{(\Delta p / L) D}{\rho u_0^2 / 2} \quad (3.26)$$

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

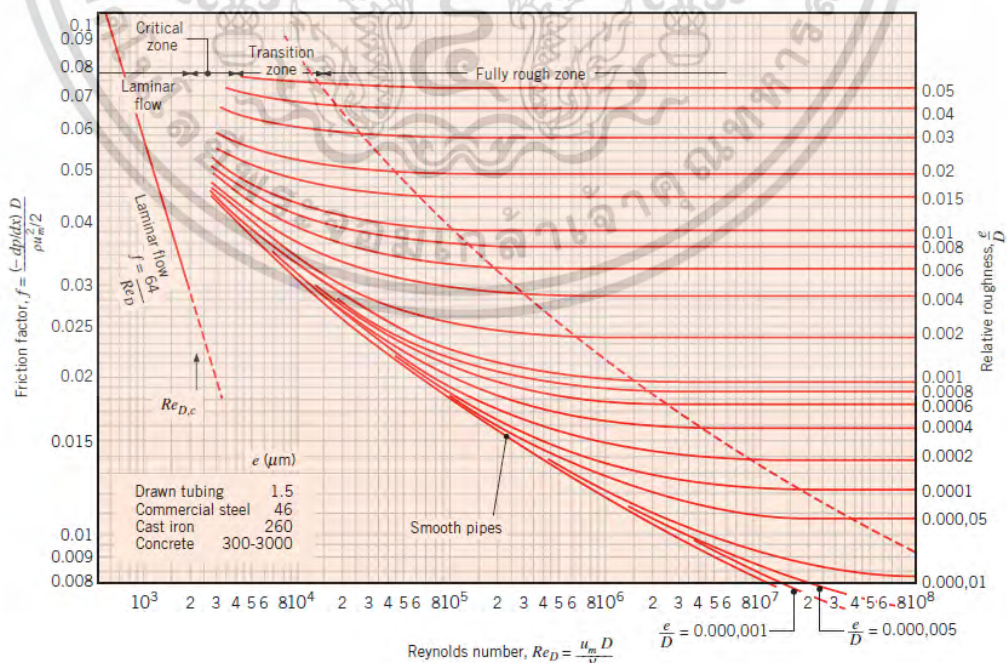
$$f = \frac{f_{Darcy}}{4} \quad (3.27)$$

สหสัมพันธ์สำหรับการไหลผ่านวัสดุพื้นผิวเรียบที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์สสูงๆ จากการพัฒนาของ Petukhov สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$f = (0.79 \ln Re_D - 1.64)^{-2} \quad (3.28)$$

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

และตารางแสดงความสัมพันธ์ของตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สหรือ Moody diagram สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลแบบสมบูรณในท่อกลม [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียความดันที่บริเวณทางเข้าท่อจะขึ้นอยู่กับรูปทรงและสภาพของท่อทางเข้าโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 ส่วนที่ทางออกของท่อจะมีค่าประมาณ 1.0 ส่วนท่อ 90 องศา จะมีค่าประมาณ 0.5 – 0.75 นอกจากนี้ในกรณีที่มีการสูญเสียความดัน Δp เกิดขึ้นในท่อ มักจะเขียนในรูปการสูญเสียพลังงานที่ไม่เกิดประโยชน์ต่อหน่วยของเวลา นั่นคือ $\frac{\Delta E_{loss}}{\Delta t}$ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$\frac{\Delta E_{loss}}{\Delta t} = \frac{\Delta p \cdot M}{\rho} = \Delta p \cdot Q \quad (3.29)$$

3.5 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

3.5.1 วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน

วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน แบ่งออกได้เป็น

- 1) การนำความร้อน
- 2) การพาความร้อน และ
- 3) การแผ่รังสี

การนำความร้อน หมายถึง กระบวนการที่ความร้อนถ่ายเทโดยอาศัยการเคลื่อนไหวยของอะตอมหรือโมเลกุลในของแข็งไปตามลำดับ

การพาความร้อน หมายถึง กระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหลในอุปกรณ์ความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม โดยมากการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุ มักจะสำคัญกว่า การถ่ายเทความร้อนภายในตัวของไหลเอง ในที่นี้ จึงจะกล่าวถึงการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าว การพาความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งจากการไหลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือความหนาแน่น) และการไหลที่เกิดขึ้นจากปั๊มหรือพัดลม เป็นต้น ซึ่งแบบแรกจะเรียกว่า การพาความร้อนตามธรรมชาติ แบบหลังจะเรียกว่า การพาความร้อนด้วยการบังคับ

การแผ่รังสี วัตถุทุกชนิดจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาว และความเข้มค่าหนึ่งจากพื้นผิวอยู่ตลอดเวลา โดยความยาวและความเข้มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน หากวัตถุอื่นดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ ก็จะได้รับพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้เรียกว่า การแผ่รังสี

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน สามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการคงที่ และกระบวนการไม่คงที่ กระบวนการคงที่หมายถึง ในการถ่ายเทความร้อน การกระจายอุณหภูมิภายในตัววัตถุและปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ส่วนในกระบวนการไม่คงที่ ปริมาณเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

3.5.2 สภาวะการถ่ายเทความร้อน

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

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ถ้า $Pr > 1$ การพัฒนาชั้นขีดผิวเชิงความร้อนจะขยายตัวเร็วกว่าชั้นขีดผิวเชิงความร้อน และกลับกันถ้า $Pr < 1$ และสำหรับอากาศการพัฒนาชั้นขีดผิวเชิงความร้อนและชั้นขีดผิวเชิงความร้อนจะใกล้เคียงกัน และจากการทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ Pr ซึ่งอาจจะประมาณได้ว่า $L_{c,th} / D \approx 10$

3.5.3 สภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

เนื่องจากมีการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของของไหลต้องเปลี่ยนแปลงตามระยะ x ซึ่งสภาวะการปรับตัวอย่างสมบูรณ์แล้วของอุณหภูมิจะไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรัชญาการนี้จะต้องจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิ เพื่อให้ได้เงื่อนไขของสภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

เมื่อกำหนดค่าความแตกต่างอุณหภูมิไร้มิติในรูป $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอยู่จริง อัตราส่วนนี้จะเป็นอิสระกับ x นั่นคือถึงแม้ว่า T ยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ x แต่ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิไร้มิตินี้จะไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งการไหลแบบนี้เรียกว่าการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน(thermally fully developed) และจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right] = 0 \quad (3.30)$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (3.31) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่องทางไหลอาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่หรือ T_s คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนกรณี T_s คงที่จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสถานะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

3.5.4 การพาความร้อน

3.5.4.1 หลักการพื้นฐานของการพาความร้อน

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

3.5.4.2 ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน

ถ้าของไหลที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอไหลเข้าสู่ในท่อที่มีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและชั้นขีดผิวของความร้อนจะเริ่มก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสถานะที่ผิวของท่อคงที่โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิว T_s คงที่ หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิว q_s'' คงที่ (ในที่นี่จะขอกกล่าวเพียงสถานะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่) สถานะพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (thermally fully developed condition) ก็เกิดขึ้น

โดยฟลักซ์ความร้อน (q_s'') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.31)$$

โดยที่ T_s คืออุณหภูมิพื้นผิว

T_m คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

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

3.5.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

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

$$\left(\frac{hD}{k}\right) = f\left\{\left(\frac{u_i D}{\mu/\rho}\right), \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)\right\} \quad (3.32)$$

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

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Re} = \frac{u_i D}{\mu / \rho} = \frac{u_i \mu}{\nu} \quad (3.34)$$

$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{u / \rho}{k / (C_p / \mu)} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.35)$$

ในที่นี้ ν เป็นสัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ ($\nu = \mu / \rho$) และ α เป็น Thermal diffusivity ($\alpha = k / (C_p \mu)$) ดังนั้น สมการที่ 3.36 จึงเขียนได้ว่า

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (3.36)$$

กล่าวคือ Nu สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันของ Re กับ Pr

3.5.4.4 ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน

ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนหรือค่าสมรรถนะเชิงความร้อน(TEF) คือ อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นที่ผิวทดสอบ (h) เทียบกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนพื้นผิวเรียบ (h_0) ที่กำลังขับเดียวกันซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้รับสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{TEF} = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} \bigg|_{pp} = \left(\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (3.37)$$

$$\text{TEF} = \frac{(\text{Nu} / \text{Nu}_0)}{(f / f_0)^{1/3}} \quad (3.38)$$

เมื่อ Nu คือ ค่าเลขนัสเซลล์จากการถ่ายเทความร้อนที่ได้

Nu₀ คือ ค่าเลขนัสเซลล์จากท่อเปล่าผิวเรียบ

f คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ได้

f₀ คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานจากท่อเปล่าผิวเรียบ

3.6 การคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง

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

3.6.1 การไหลช้าเป็นช่วงเชิงความเร็ว

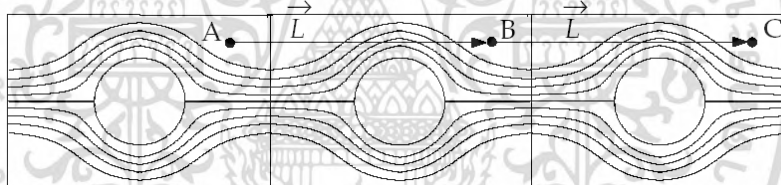
การไหลช้าเป็นช่วงเชิงความเร็วเป็นลักษณะการไหลเมื่อมีค่าความดันตกคร่อมเกิดขึ้นข้ามขอบเขตการไหลตามแนวทิศทางการไหลและเกิดขึ้นกับการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์แล้ว ลักษณะการไหลเช่นนี้มีการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตที่ซ้ำกันต่อกันไปตามแนวทิศทางการไหลและเกิดขึ้นซ้ำกันเป็นวงรอบเรื่อยไป สภาวะการไหลที่ช้าเป็นช่วงนี้เกิดขึ้นหลังจากมีช่วงของความยาวขาเข้าที่เพียงพอ โดยขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์สของการไหลและรูปร่างทางเรขาคณิตของช่องทางไหล

3.6.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลช้าเป็นช่วง

สภาวะของการไหลช้าเป็นช่วงเกิดขึ้นดังกล่าวมานั้น เมื่อรูปแบบการไหลเกิดขึ้นซ้ำกันในช่วงการไหล L โดยมีค่าความดันตกคร่อมคงที่ในช่วงโมดูลนั้นๆ ตามแนวทิศทางการไหล นิยามของการไหลช้าเป็นช่วงเชิงความเร็วถูกกำหนดโดยค่าของความเร็วย่อยนั้นจะซ้ำกันโดยตัวมันเอง ดังสมการ

$$u_i(\vec{r}) = u_i(\vec{r} + \vec{L}) = u_i(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.39)$$

เมื่อ \vec{r} คือเวกเตอร์บอกตำแหน่ง และค่า \vec{L} คือเวกเตอร์ของความยาวที่ซ้ำเป็นช่วงของขอบเขตการไหลที่พิจารณา แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง

จากรูปสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\begin{aligned} u_A &= u_B = u_C & \tilde{p}_A &= \tilde{p}_B = \tilde{p}_C \\ v_A &= v_B = v_C & p_B - p_A &= p_C - p_B \end{aligned}$$

3.6.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลช้าเป็นช่วง

สำหรับการไหลแบบมีความหนืดร่วมด้วยนั้น ค่าของความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นจะไม่ซ้ำเป็นช่วงตามนิยามของความเร็ว แต่ค่าของความดันตกคร่อมช่วงของการไหลหรือโมดูลนั้นๆ จะยังคงมีค่าเท่ากัน สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta p = p(\vec{r}) - p(\vec{r} + \vec{L}) = p(\vec{r} + \vec{L}) - p(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \quad (3.40)$$

ค่าเกรเดียนต์ของความดันเฉพาที่สามารถแยกออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนของเกรเดียนต์ที่ซ้ำเป็นช่วง, $\nabla \bar{p}(\bar{r})$ และส่วนของเกรเดียนต์ของการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น, $\beta \frac{\bar{L}}{|\bar{L}|}$ โดยแสดงได้ดังสมการ

$$\nabla p(\bar{r}) = \beta \frac{\bar{L}}{|\bar{L}|} + \nabla \bar{p}(\bar{r}) \quad (3.41)$$

เมื่อค่า $\bar{p}(\bar{r})$ คือความดันที่ซ้ำกันเป็นช่วง (periodic pressure) และค่า $\beta|\bar{r}|$ คือส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดัน โดยที่ค่าความดันที่ซ้ำกันเป็นช่วงคือผลต่างของความดันทางด้านทางเข้ากับความดันที่ด้านทางออกที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น และส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดันเป็นผลของแรงที่กระทำต่อของไหลในสมการโมเมนตัม ซึ่งค่า β นั้นจะเป็นค่าที่ไม่ทราบมาก่อนและจะหาค่าได้จากการคำนวณซ้ำจนกระทั่งการไหลมีค่าของอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ตอนเริ่มต้น

3.6.2 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน

การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนตามแนวทิศทางการไหลนั้น สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับกรณีที่มีค่าฟลักซ์ความร้อนให้คงที่ที่ผนัง ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างขอบเขตที่ซ้ำเป็นช่วงจะมีค่าคงที่ และมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มของความร้อนสุทธิจากขอบเขตของผนัง

เมื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นซ้ำกันเป็นช่วง สนามอุณหภูมิจะมีความคล้ายคลึงกับสนามของความดันในกรณีของการไหลเป็นช่วงเชิงความเร็ว โดยมีสมการดังนี้

$$\frac{T(\bar{r} + \bar{L}) - T(\bar{r})}{L} = \frac{T(\bar{r} + 2\bar{L}) - T(\bar{r} + \bar{L})}{L} = \sigma \quad (3.42)$$

เมื่อค่า σ คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนได้ในเทอมของการเพิ่มความร้อนทั้งหมดภายในโดเมน, Q ดังสมการ

$$\sigma = \frac{Q}{\dot{m}c_p L} = \frac{T_{\text{bulk, exit}} - T_{\text{bulk, inlet}}}{L} \quad (3.43)$$

เมื่อค่า \dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวลที่กำหนดให้

และค่า T_{bulk} มีนิยามโดย

$$T_{\text{bulk}} = \frac{\int_A T|\rho\bar{u} \cdot d\bar{A}|}{\int_A |\rho\bar{u} \cdot d\bar{A}|} \quad (3.44)$$

เมื่อ T_{bulk} อินทิเกรตตลอดพื้นที่หน้าตัดของโดเมนการไหลที่ซ้ำเป็นช่วง, A

บทที่ 4

การออกแบบอุปกรณ์และขั้นตอนการศึกษา

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขและพฤติกรรมการไหลภายในท่อกลมที่ใส่ตัวสร้างการไหลหมุนวน สามารถแบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยขั้นที่ 1 เป็นขั้นตอนการออกแบบท่อที่มีการใส่ตัวสร้างการหมุนวน ขั้นที่ 2 จะเป็นขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำ ขั้นตอนที่ 3 จะเป็นขั้นตอนดำเนินการศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนและทำการบันทึกข้อมูล

4.1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน และพฤติกรรมการไหลภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งงานวิจัยเป็นการศึกษาเชิงตัวเลขจึงมีการกล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ และกำหนดตัวแปรหลักๆที่ใช้ในการศึกษาดังต่อไปนี้ คือ ศึกษาอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, a_r) ศึกษาอัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกท่อกลม (l_E / D) อัตราส่วนระยะพิตช์ (P_R) และมุมปะทะการไหล (α) โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) = 0.05 m หรือเท่ากับ 50 mm ได้ทำการศึกษาแหวนทรงกรวย

ค่าตัวแปรหลักที่กำหนดในการศึกษาครั้งนี้

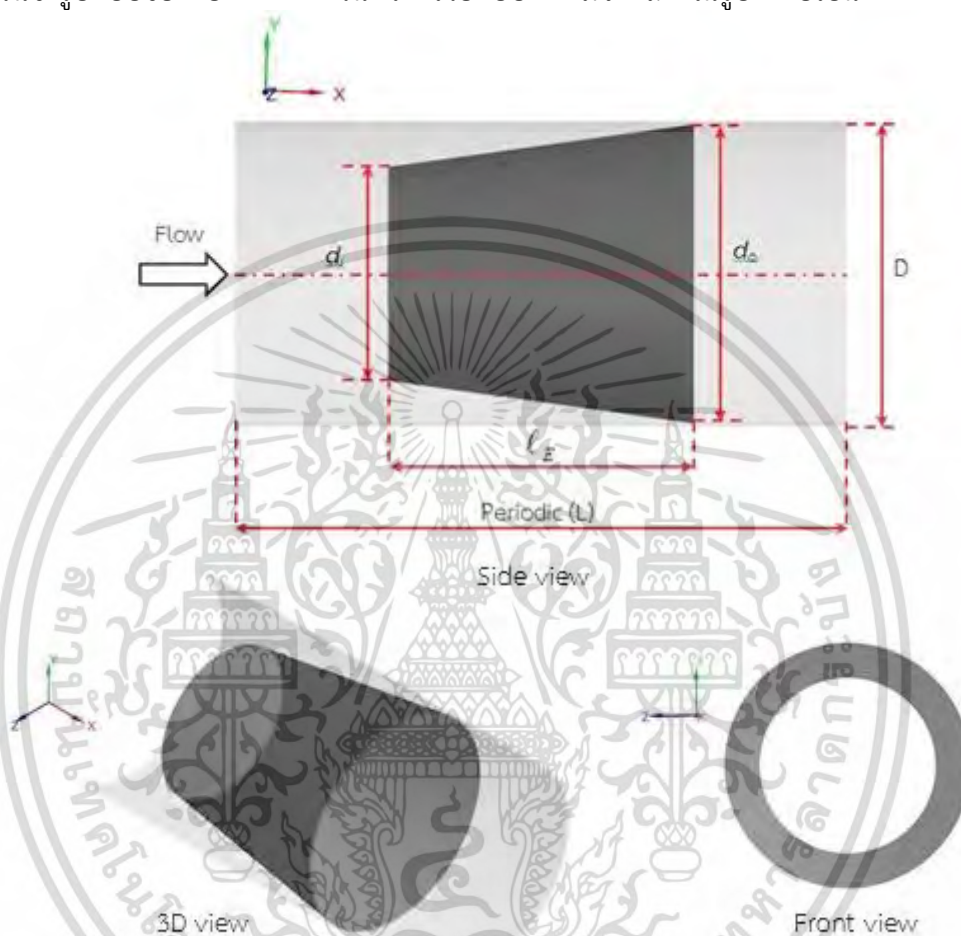
1. แหวนทรงกรวยวงรีแบบดั้งเดิมที่อัตราส่วนความกว้างทางเข้า $D_{R,i}=0.7$, อัตราส่วนความกว้างทางออก $D_{R,o}=0.98$, อัตราส่วนระยะพิตช์ $P_R= 2.0$, อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, $a_r=1.0$)
2. จากนั้นจึงปรับปรุงรูปแบบแหวนทรงกรวยโดยปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, a_r) เพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนให้ดียิ่งขึ้น
3. ศึกษาอัตราส่วนความกว้างที่ทางเข้า $D_{R,i}=0.5, 0.6$, และ 0.7
4. ศึกษาอัตราส่วนความกว้างที่ทางออก $D_{R,o}=0.94, 0.96$, และ 0.98
5. ศึกษาอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, a_r) = $0.4, 0.6, 0.8$, และ 0.9
6. ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ที่ $P_R= 1.5, 2.0, 2.5$, และ 3.0
7. ศึกษาอัตราส่วนความยาวแหวนทรงกรวยต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกท่อกลม (l_E / D) = $0.25D, 0.5D$ และ $0.75D$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 รูปร่างของกรวยที่ใช้ในการศึกษา

4.2.1 แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

การศึกษาครั้งนี้ เริ่มต้นจากการศึกษารูปแบบท่อที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม คือ ค่าตัวแปรหลักที่กำหนดไว้ และเริ่มศึกษาที่รูปแบบของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมหรือตัวสร้างการไหลหมุนวนซึ่งรูปแบบของท่อที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมจะแสดงในรูปดังต่อไปนี้

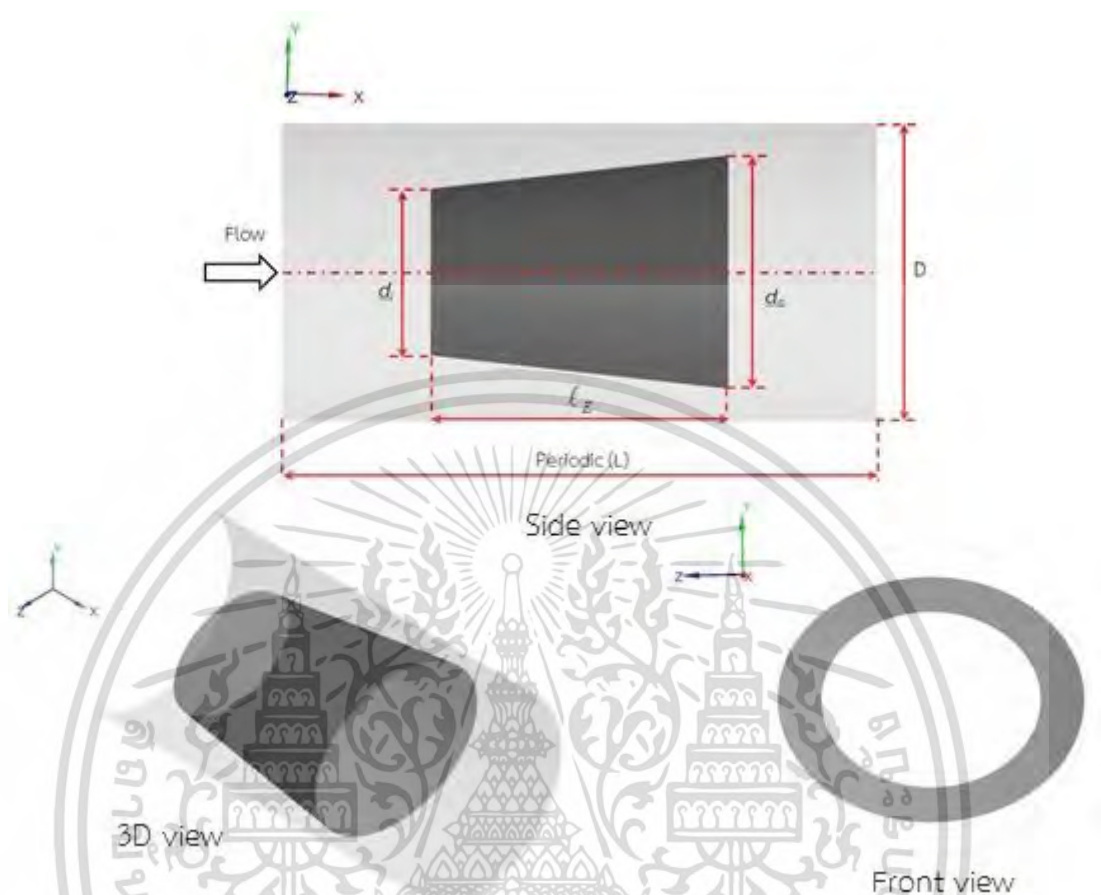


รูปที่ 4.1 ลักษณะของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

หลังจากที่ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมที่การจัดวาง (converging conical ring, CR) สามารถเหนี่ยวนำให้ของไหลเกิดการไหลแบบหมุนวน จึงส่งผลให้เกิดการผสมผสานกันระหว่างของไหลเย็นตรงกลางท่อกับของไหลร้อนบริเวณผนังท่อและเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบท่อที่ใส่แหวนทรงกรวยให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้ยังถือว่าได้ผลไม่ด้นัก จึงเป็นสาเหตุที่ต้องทำการปรับปรุงรูปร่างของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมเพื่อให้เกิดการไหลหมุนวนช่วยให้เกิดการระบายความร้อนที่ผิวท่อต่อไป โดยทำการปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, a) ต่อทำการลดค่า (aspect ratio, a) ซึ่งคาดหวังว่าจะสามารถลดค่าความดันตกคร่อมและจะส่งผลให้ค่าการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

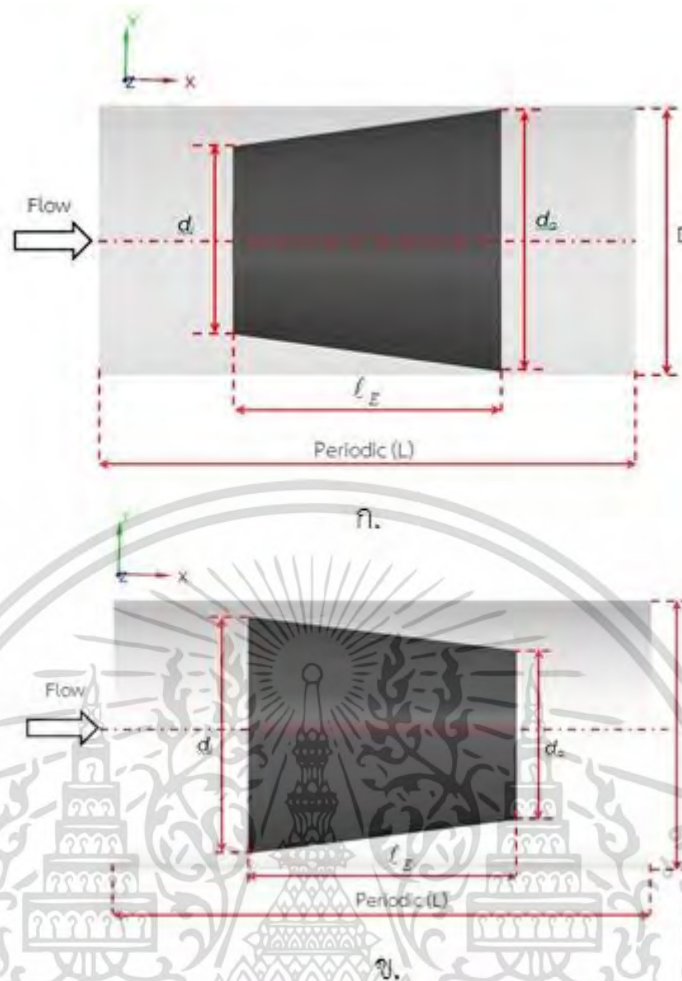
ถ่ายเทความร้อนที่ได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะของแหวนทรงกรวยที่ปรับปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะของรูปแบบแหวนทรงกรวยที่ปรับค่า(aspect ratio, a_r)

4.2.1 ลักษณะการจัดวางของแหวนทรงกรวยแบบวงรี

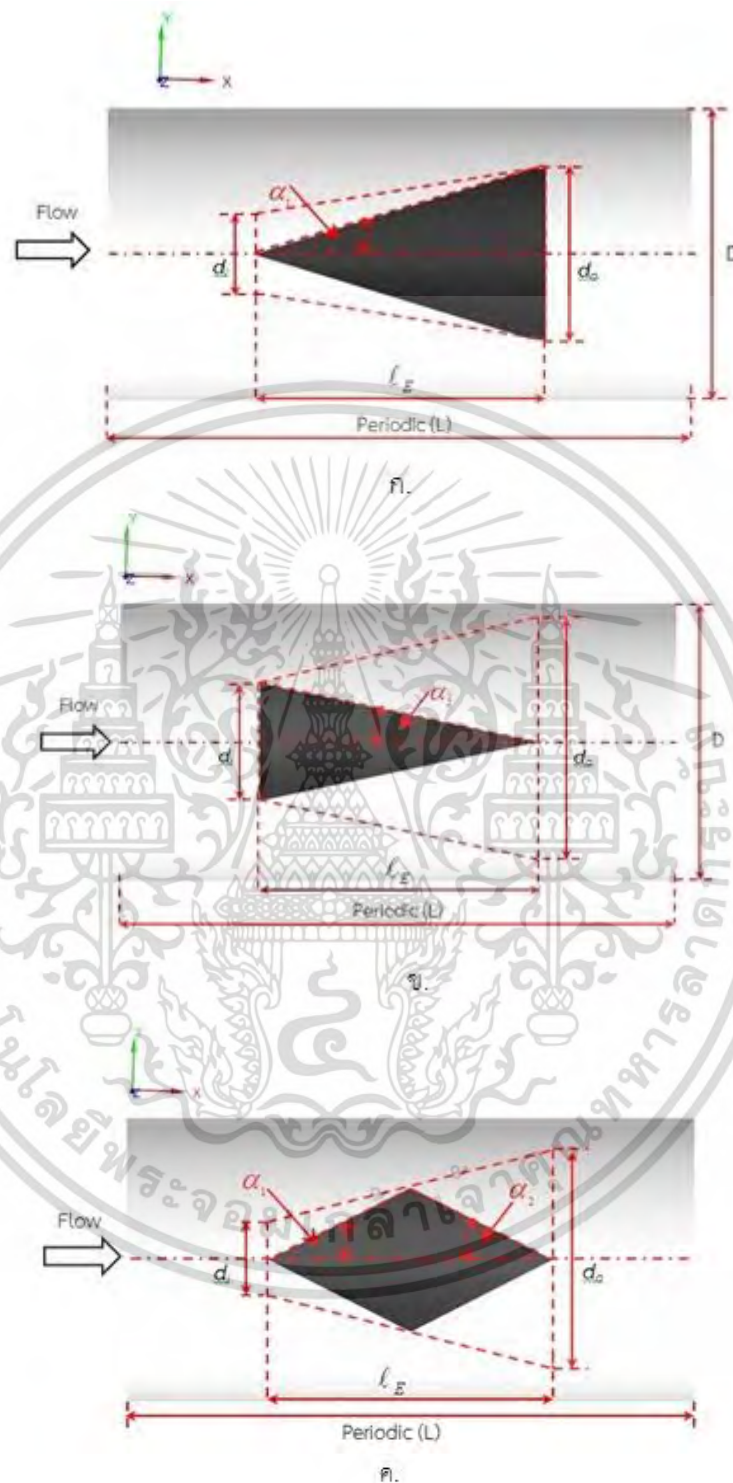
หลังจากที่ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวยวงรีพบว่าเมื่อของไหลไหลผ่านแหวนทรงกรวยทำให้เกิดการไหลหมุนวนสามารถเหนี่ยวนำให้ของไหลเกิดการไหลแบบหมุนวน จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลบริเวณตรงกลางต่อกับบริเวณผนังท่อมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ แต่อย่างไรก็ตามการใส่แหวนทรงกรวยวงรีภายในท่อจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้ยังถือว่าได้ผลไม่ด้นัก จึงเป็นสาเหตุที่ต้องทำการปรับปรุงรูปแบบของกรวยรูปทรงอื่นๆต่อไปเพื่อหาอิทธิพลของแหวนทรงกรวยที่ผลต่อพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยทำการปรับเปลี่ยนลักษณะการจัดวางของแหวนทรงกรวย ซึ่งคาดหวังว่าค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นและค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการปรับเปลี่ยนลักษณะการจัดวางจะมีค่าลดลง ลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมจะสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อ ก.converging eilliptical ring,CER
ข.diverging eilliptical ring,DER

หลังจากที่ทำศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในท่อกลมที่มีการจัดวางแหวนทรงกรวยที่แตกต่างกันที่สลับระหว่างการจัดวางรูปแบบที่หนึ่งกำหนดให้ทางเข้าเล็กทางออกใหญ่ และแบบที่สองทางเข้าใหญ่ทางออกเล็ก พบว่าการจัดวางรูปแบบแรกทีทางเข้าเล็กทางออกใหญ่ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนดีกว่าแบบที่สองที่จัดวางโดยทางเข้าใหญ่ทางออกเล็ก ซึ่งได้รับอิทธิพลของรูปร่างแหวนทรงกรวยและการจัดวางส่งผลให้เกิดหมุนวนเมื่อของไหลไหลผ่านแหวนทรงกรวยจะทำให้กระแสน้ำเกิดการหมุนวนและเกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลเย็นบริเวณตรงกลางท่อกับอากาศร้อนบริเวณผนังท่อส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงกว่ารูปแบบการจัดวางแบบที่สองและท่อเปล่าผิวเรียบ แต่อย่างไรก็ตามการใส่แหวนทรงกรวยที่ทางเข้าเล็กทางออกใหญ่ภายในท่อจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพที่ได้ยังถือว่าได้ผลไม่ดึ้นก จึงเป็นสาเหตุที่ต้องทำการปรับปรุงร่างของแหวนทรงกรวยโดยการตัดกรวยเพื่อให้เกิดการปะทะการไหลเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนวนเพื่อจะเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้มีค่าสูงมากขึ้น ต่อมาก็จะทำการตัดเนื้อกรวยวงรีที่มุมต่างตามที่กำหนดไว้ ซึ่งคาดหวังว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการปรับเปลี่ยนรูปร่างจะมีค่าลดลง ลักษณะของกรวยวงรีที่มีการปรับปรุงร่างโดยการตัดเพื่อให้เกิดมุมปะทะการไหลในท่อกลมผิวเรียบจะสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ลักษณะของกรวยที่ปรับปรุงรูปร่างและรูปแบบการตัดที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นการปรับปรุงรูปแบบของแหวนทรงกรวย 3 แบบ มีจุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อม โดยที่กำหนดลักษณะการตัดการตัดและมุมในการตัด และทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลภายในท่อกลมที่มีการใส่ใส่แหวนทรงกรวยแบบ ก.ตัดด้านทางเข้าทำมุม(ทรงรูปลิ้ม) ข.ตัดด้านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางออก(ทรงรูปปลีมีกลับทิศ) ค.ตัดหน้าตัดหลัง(ทรงรูปเพชร) พบว่าการใส่แหวนทรงกรวยแบบตัดมุมที่ทางเข้าทำให้เกิดการไหลหมุนควงภายในท่อที่รุนแรงกว่าการตัดแบบอื่นๆ จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลบริเวณตรงกลางท่อกับบริเวณผนังท่อได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับแหวนทรงกรวยรูปแบบอื่นๆและท่อเปล่าผิวเรียบ จากการศึกษาพบว่าแหวนทรงกรวยวงรีที่ตัดด้านทางเข้าเป็นรูปร่างที่เหมาะสมส่งผลให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงที่สุดในงานวิจัยในครั้งนี้

4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา

ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรที่ให้ความสนใจอยู่ 4 ตัวแปร คือเลขเรย์โนลด์ส (Re) ตัวประกอบเสียดทาน (f) เลขนัสเซลท์ (Nu) และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) ที่อยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละสมการมีดังนี้

ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์สนิยามโดย

$$Re = \rho \bar{u} D / \mu \quad (4.1)$$

ตัวประกอบความเสียดทาน, f คำนวณได้จากความดันตกคร่อม, Δp ตลอดช่วงความยาว Periodic ของท่อกลม, L

$$f = \frac{(\Delta p) D}{\frac{1}{2} \rho L \bar{u}^2} \quad (4.2)$$

การถ่ายเทความร้อนคำนวณหาจากค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะที่ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$Nu_x = \frac{h_x D}{k} \quad (4.3)$$

ค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยสามารถคำนวณได้จาก

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_x \partial A \quad (4.4)$$

สมรรถนะเชิงความร้อน TEF

$$TEF = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (4.5)$$

เมื่อ Nu_0 และ f_0 คือเลขนัสเซลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่าผิวเรียบ ตามลำดับ

4.4 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

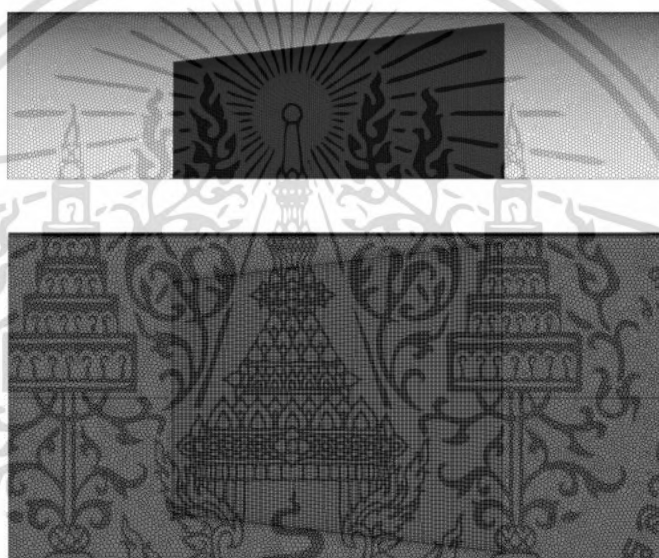
เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณเชิงตัวเลขพิจารณาทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translation ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ กำหนดอุณหภูมิของอากาศเข้าที่ 300K คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า กำหนดให้ค่าเลขพรานด์ (Prandtl number, Pr) มีค่าคงที่เท่ากับ 0.707 และของไหลไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ กำหนดให้เงื่อนไขขอบเขตที่ผนังมีความเร็วเท่ากับศูนย์ (no slip condition) และเป็นผนังที่อยู่กับที่ไม่มีการสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทะเลที่ผนังท่อ (stationary wall) กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนของแผ่นบางพร้อมปีกคูมามีค่าเท่ากับ ศูนย์หรือเป็นฉนวน กำหนดให้ผนังของท่อกลมมีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่ 600 W/m^2

4.5 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม

สำหรับงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่ใส่ตัวสร้างการหมุนวนในรูปแบบของแหวนทรงกรวยแบบต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น การตรวจสอบหาจำนวนกริดที่เหมาะสมกับการศึกษาในครั้งนี้โดยมีอากาศเป็นของไหลทดสอบ โดยใส่ตัวสร้างการหมุนวนภายในท่อกลมแบบ(converging elliptical ring,CER) กำหนดให้พิจารณาการไหลแบบเป็นคาบ (periodic) โดยคำนวณการไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง มีขอบเขตการไหลเป็นแบบสมมาตร (symmetry planes) ลักษณะการสร้างรูปแบบกริดและขอบเขตการไหลในงานวิจัยนี้ได้แสดงดังรูปที่ 4.7

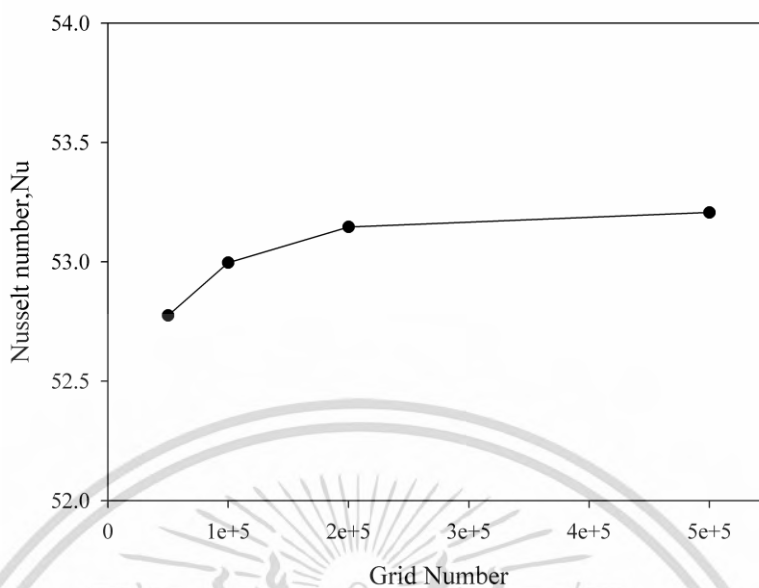


รูปที่ 4.5 ลักษณะกริดและขอบเขตการไหลของท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวย

โดยโดเมนที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยเป็นเอลิเมนต์รูปทรงหกเหลี่ยม ได้ใช้การแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) ซึ่งพิจารณาบริเวณที่ใกล้ผนังให้มีจำนวนกริดที่หนาแน่นโดยเพิ่มกริดเซลล์เป็นชั้น Layer และบริเวณที่ห่างออกไปจากผนังก็มีจำนวนกริดที่เบาบางลง ซึ่งการหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อคำตอบ ได้ทำการเปรียบเทียบผลเฉลยโดยใช้จำนวนกริดที่แตกต่างกัน คือที่ 50,000 100,000 200,000 และ 500,000 พบว่าช่วงจำนวนกริดจาก 200,000 เซลล์เพิ่มขึ้นเป็น 500,000 เซลล์ค่าเลขชั้นเซลล์และค่าตัวประกอบเสียดทานเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า $\pm 1\%$ ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริดที่ 250,000 เซลล์ไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆต่อไป

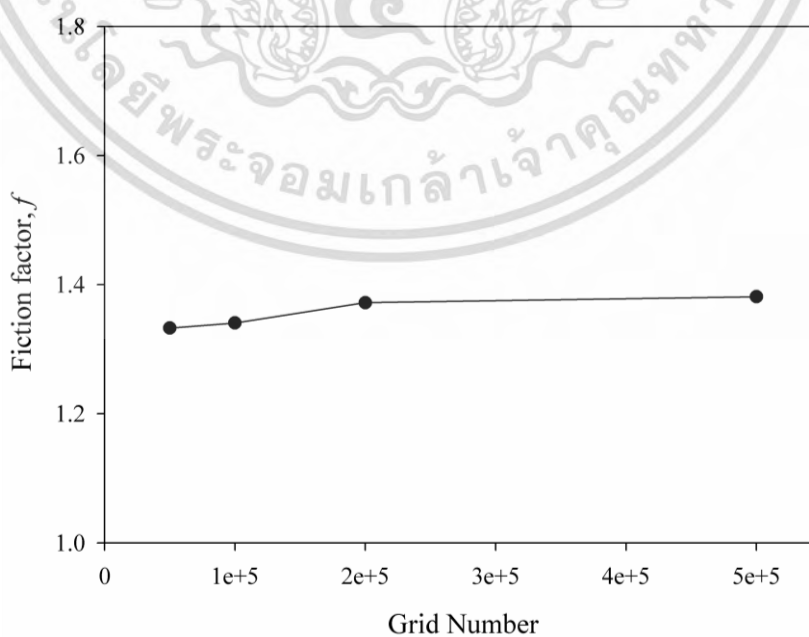
ตารางที่ 4.1 จำนวนของกริดที่ใช้ในการทดสอบ

Grid number	50,000	100,000	250,000	500,000
Nu	52.7753	52.9965	53.1456	53.2065
f	1.3324	1.3407	1.3745	1.3813



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า Nu ที่ Re=6000

จากรูปที่ 4.8 ซึ่งให้เห็นว่าการสร้างกริดจำนวน 50,000 ให้ค่าเลขนัสเซิลท์ (Nu) ที่ต่างจากกริดที่จำนวน 100,000 เซลล์ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนถึง $\pm 0.41\%$ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนกริดขึ้นเป็น 200,000 และเมื่อเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลท์ที่จำนวนกริด 100,000 กับ 200,000 พบว่าให้ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ $\pm 14.91\%$ ซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่สูง และทำการเพิ่มจำนวนกริดออกไปที่จำนวน 500,000 กริดเพื่อค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบจำนวนกริดระหว่าง 200,000 กับ 500,000 เซลล์มีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $\pm 0.11\%$ ซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า f ที่ Re=6000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 ซึ่งให้เห็นว่าการจำนวนกริดที่ 50,000 ให้ค่า f ที่ต่างจากจำนวนกริดที่ 100,000 ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนที่ $\pm 0.61\%$ แต่ในทอมของ Nu นั้นจำนวนกริดในช่วงนี้มีค่าคลาดเคลื่อนสูงดังนั้นจึงจำเป็นที่จะเพิ่มกริดเป็น 200,000 และเมื่อเปรียบเทียบค่า f ที่จำนวนกริด 100,000 กับ 200,000 พบว่าให้ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ $\pm 2.2\%$ และทำการเพิ่มจำนวนกริดออกไปที่จำนวน 500,000 กริดเพื่อค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบจำนวนกริดระหว่าง 200,000 กับ 500,000 เซลล์มีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $\pm 0.49\%$ ซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เมื่อพิจารณาจากผลทดสอบจำนวนกริดจากทั้งค่า Nu และ f แล้วจึงได้เลือกใช้จำนวนกริดอยู่ในช่วง 200,000 ในการศึกษาเนื่องจากการทดสอบจำนวนกริดอยู่ในค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้และไม่จำเป็นต้องใช้จำนวนกริดที่มากไปกว่านี้เพื่อลดภาระการคำนวณให้น้อยลงจากการเลือกใช้จำนวนกริดที่เหมาะสม

4.6 วิธีการดำเนินการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตที่มีการทดสอบการใส่ตัวสร้างการไหลหมุนวนในท่อกลมโดยใช้รูปแบบแหวนทรงกรวยแบบต่างๆและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข
2. สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้
3. ทำการทดสอบแบบจำลองเพื่อหาจำนวนกริดที่เหมาะสมในที่ใช้ในการศึกษา
4. สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขและปรับปรุงรูปแบบของแหวนทรงกรวยรูปแบบต่างๆ เพื่อหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน โดยทดสอบที่เลขเรย์โนลด์ส 3000 ถึง 20,000 เพื่อหารูปทรงของแหวนทรงกรวยที่เหมาะสม
5. ปรับรูปทรงของแหวนทรงกรวยตามค่าตัวแปรที่กำหนดไว้เพื่อหารูปทรงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงขึ้นและปรับอัตราส่วนพิทช์ อัตราส่วนความสูงปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ มุมปะทะ เป็นต้น และทดสอบที่เลขเรย์โนลด์ส 3000 ถึง 20,000 เพื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน
6. บันทึกข้อมูลค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้จากการทดลองในแต่ละกรณี
7. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้เพื่อเปรียบเทียบผลของรูปทรงกรวยแต่ละแบบ จากการศึกษาครั้งนี้ โดยวิเคราะห์จากค่าการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของเลขนัสเซลท์ ค่าความดันตกคร่อมซึ่งอยู่ในรูปของตัวประกอบเสียดทาน และค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการศึกษาเชิงตัวเลขและการอภิปราย

จากผลงานวิจัยในอดีตที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 เมื่อมีการใส่ตัวสร้างการหมุนควงภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูง และส่วนใหญ่ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของแหวน ทรงกรวย ดังนั้นในบทนี้กล่าวถึงผลที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขโดยผลของการถ่ายเทความร้อนโดย แสดงในเทอมของเลขนัสเซลท์ (Nusselt number, Nu) และการวิเคราะห์ผลของการสูญเสียความดัน โดยแสดงในเทอมของค่าตัวประกอบเสียดทาน (friction factor, f) ซึ่งจะพิจารณาในส่วน อิทธิพล ของเลขเรย์โนลด์ส อิทธิพลของความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, a_r) อิทธิพลของมุมปะทะการไหล อิทธิพลของรูปร่างที่ปรับปรุงรูปแบบต่างๆโดยแสดงผลจากการศึกษา ด้วยรูปภาพซึ่งแสดงพฤติกรรมการไหลที่ส่งผลต่อพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตก คร่อม เช่น การแสดงเส้นกระแสการไหล 2 มิติ 3 มิติ คอนทัวร์หรือการกระจายอุณหภูมิ และคอนทัวร์ การกระจายเลขนัสเซลท์ และแสดงผลจากการศึกษาด้วยกราฟ เช่น แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนเลขนัสเซลท์ (Nu/Nu_0) กับเลขเรย์โนลด์ส (Re) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัว ประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ส (Re) และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ส (Re) ซึ่งการแสดงผลในลักษณะดังกล่าวจะช่วยให้สามารถอธิบายถึงค่า การถ่ายเทความร้อนและค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเมื่อมีการใส่แหวนทรงกรวยเพื่อ สร้างการไหลหมุนวน

5.1 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข

ก่อนทำการศึกษาเชิงตัวเลขของแบบจำลองท่อที่ใส่อุปกรณ์เพิ่มการถ่ายเทความร้อน ต้องมีการ ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อให้แน่ใจว่าผลการจำลองที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้มีความ ถูกต้องแม่นยำ โดยเลือกเปรียบเทียบผลของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ได้กับงานวิจัยในอดีตของ Promvong[13] โดยใช้เงื่อนไขเดียวกันคือใช้แหวนทรงกรวยติดตั้งภายในท่อเพื่อสร้างการไหลหมุน วนและความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออกที่ค่า ($a_r=0.9$) และลักษณะการจัดวางแบบ (converging conical ring, CER) เปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ ในรูปแบบต่างๆ

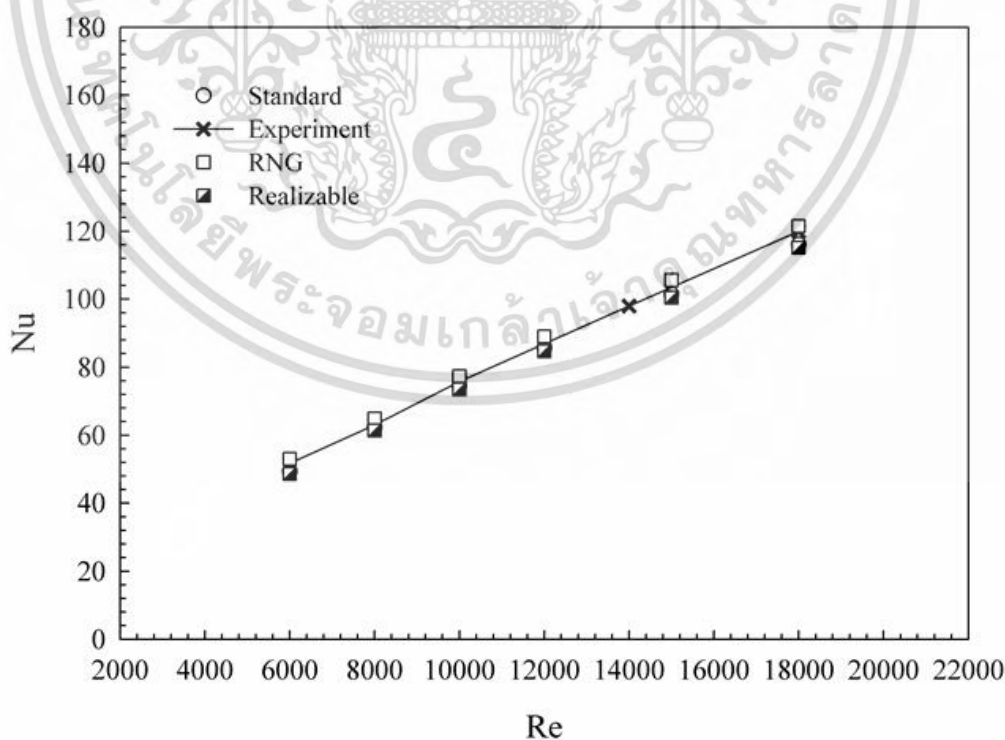
5.1.1 เลขนัสเซลท์

รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สกรณีท่อที่ใส่อุปกรณ์เพิ่มการ ถ่ายเทความร้อนแบบแหวนทรงกรวยที่อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก $a_r=0.9$ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการศึกษาเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง พบว่าในช่วงการไหลแบบ ปั่นป่วนเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าเลขนัสเซลท์ที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขค่าที่ได้มี ความใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลองของ Promvong[13] และเมื่อ ค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าค่าเลขนัสเซลท์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งทำการ เปรียบเทียบค่าที่ได้ในช่วงเลขเรย์โนลด์ส $Re=3,000 - 20,000$ โดยแบบจำลองปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ ให้ผลของเลขนัสเซลท์ใกล้เคียงกับผลทดลองของ Promvong[13] มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลอง

ปั่นป่วนอื่นๆ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซิลท์ที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 2.78\%$ ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

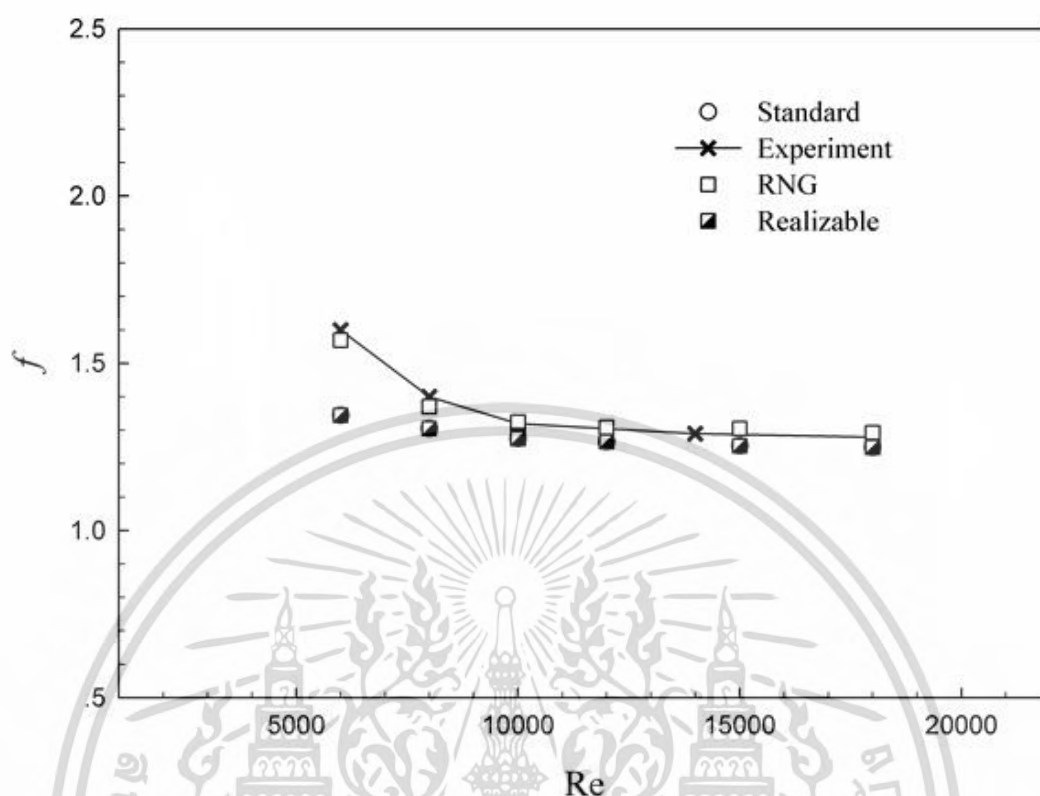
จากรูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สกรณีท่อที่ใส่อุปกรณ์เพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบแหวนทรงกรวยที่อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก $a_r = 0.9$ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการศึกษาเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขค่าที่ได้มีความใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลองของ Promvong[13] และจะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้น ซึ่งทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้ในช่วงเลขเรย์โนลด์ส $Re = 3000 - 20,000$ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k - \epsilon$ model ให้ผลของค่าเลขนัสเซิลท์ใกล้เคียงกับผลทดลองของ Promvong[13] มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองปั่นป่วนอื่นๆ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5.81\%$ ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ดังนั้นแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้จึงเหมาะสมกับการนำไปทดลองต่อไป

ผลการศึกษาเชิงตัวเลขของแบบจำลองท่อที่ใส่อุปกรณ์เพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เทียบกับผลการทดลองของ Promvong[13] ที่ได้รับการตีพิมพ์ในอดีตที่ผ่านมาซึ่งเป็นที่น่าเชื่อถือได้ โดยค่าเลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขจะเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Promvong[13] ซึ่งค่าเลขนัสเซิลท์มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ $\pm 2.78\%$ และตัวประกอบเสียดทานมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ $\pm 5.81\%$ ซึ่งถือว่าผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้มีความเชื่อถือได้



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สและผลการทดลองของ Promvong[13]

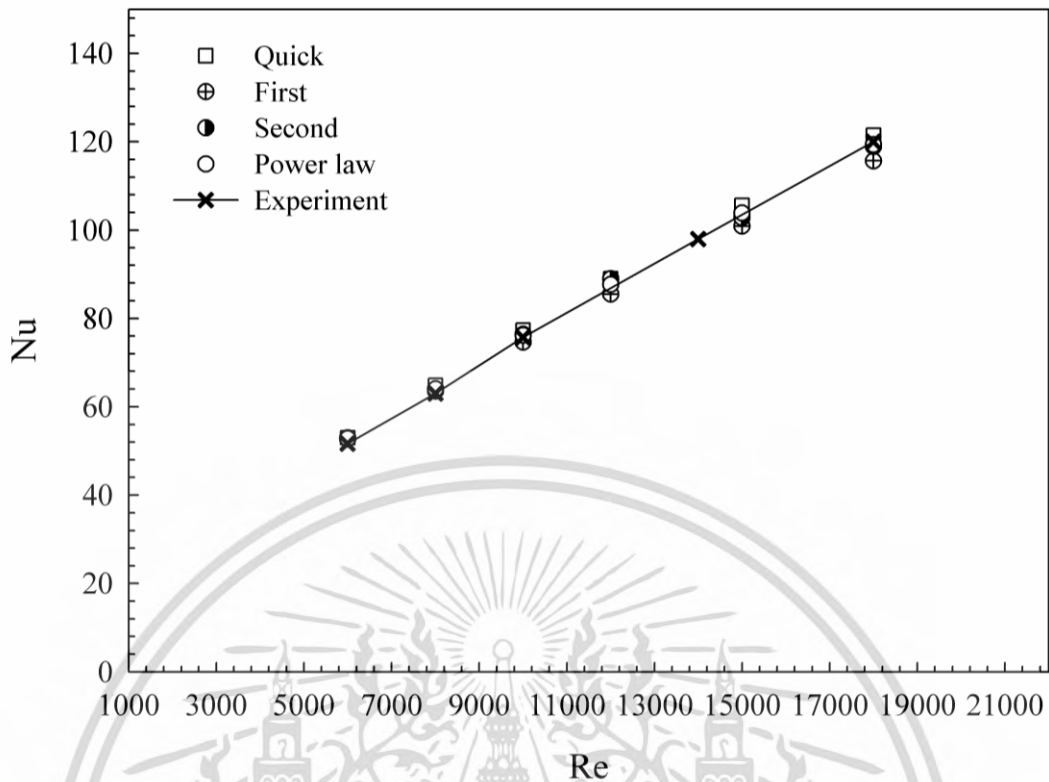
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



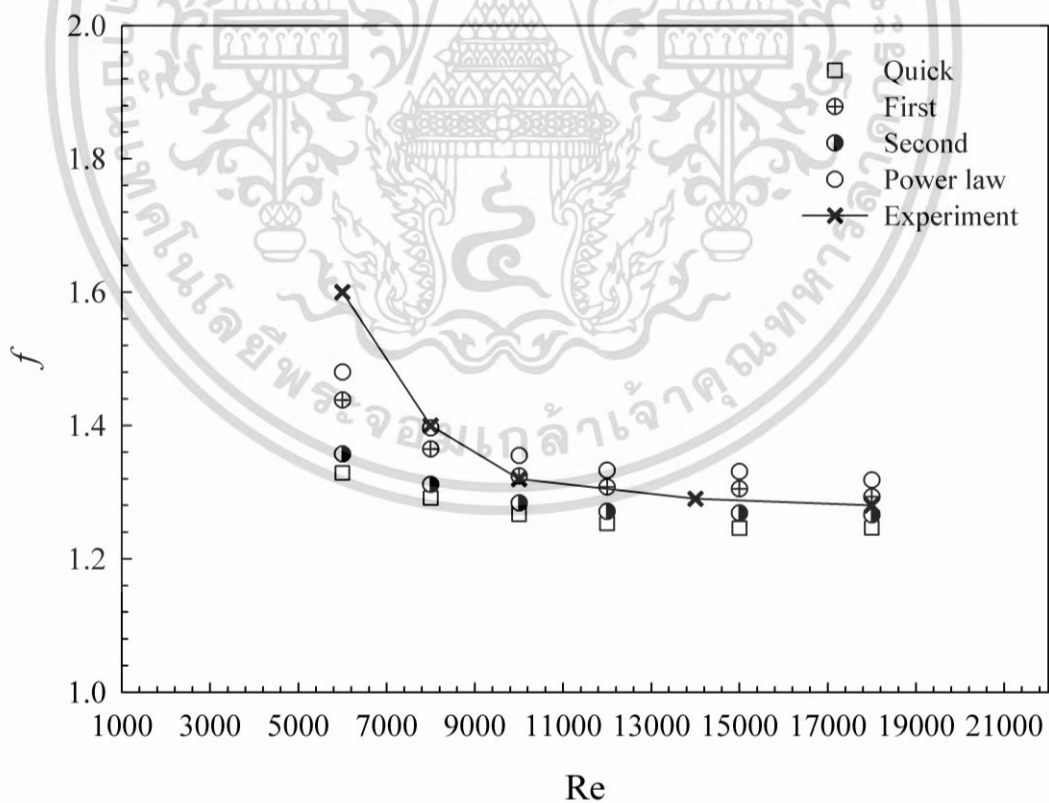
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส และผลการทดลองของ Promvonge[13]

5.1.2 การตรวจสอบกระบวนการวิธี (scheme)

จากการเปรียบเทียบในหัวข้อก่อนหน้านี้ทำให้เราทราบว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ แต่กระบวนการวิธีที่ใช้ในการศึกษาในหัวข้อก่อนหน้านี้มีเพียงแบบ QUICK เท่านั้น จึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบว่ายังมีกระบวนการวิธีอื่นๆ ที่สามารถให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำและมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Promvonge[13] มากกว่านี้หรือไม่ ซึ่งผลการเปรียบเทียบของการทดลองและแบบจำลองปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ model ในกระบวนการวิธีต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 พบว่าผลที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขเมื่อเทียบกับผลการทดลองพบว่ากระบวนการวิธีแบบ QUICK ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซลล์ท์ที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 2.01\%$ และตัวประกอบเสียดทานของแบบจำลองเชิงตัวเลขเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 1\%$ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ model ที่ใช้กระบวนการวิธีแบบ QUICK มีความเหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้



รูปที่ 5.3 เลขนัสเซิลท์จากกระบวนการวิธีต่างๆ และผลการทดลองของ Promvonge[13]



รูปที่ 5.4 ตัวประกอบเสียดทานที่กระบวนการวิธีต่างๆ และผลการทดลองของ Promvonge[13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการศึกษาเชิงตัวเลขของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขของแบบจำลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม ทำการศึกษาที่อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, ar)=0.6, 0.8 และ 0.9 อัตราส่วนระยะพิตซ์ (PR=1.5, 2.0 และ 2.5) เพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะการไหลและอัตราส่วนระยะพิตซ์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนต่อไป

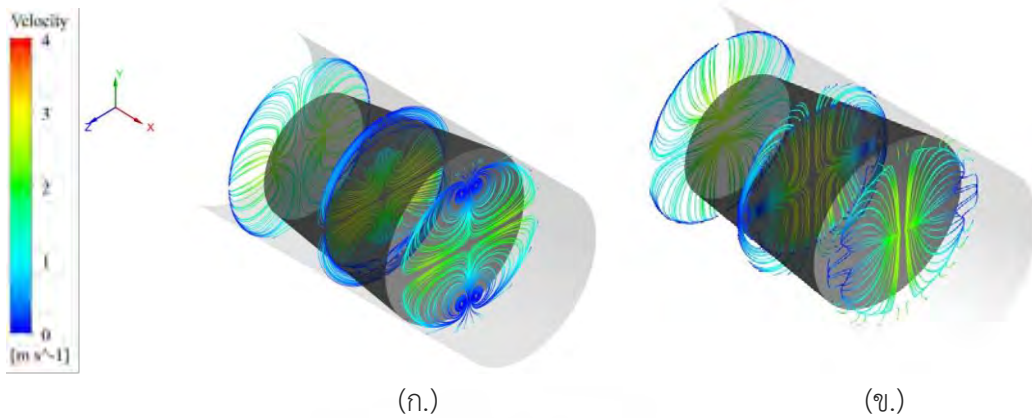
5.2.1 อิทธิพลของรูปร่างที่มีผลต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

รูปแบบการจัดวางตัวสร้างการไหลหมุนควงแบบแหวนทรงกรวย ซึ่งทำการปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก จากการศึกษาในครั้งนี้ทำการปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออกสองลักษณะจากรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นลักษณะของแบบจำลองของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมที่ค่า $a_r=1.0$ และแหวนทรงกรวยแบบวงรีที่ปรับค่า $a_r=0.6, 0.8,$ และ 0.9 ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งพิจารณาที่ $\alpha=16.5^\circ, 25^\circ,$ และ 30° ที่ค่า PR = 1.5, 2.0, และ 2.5 และพิจารณาที่ Re = 3000 ถึง 20,000 แสดงได้ดังรูปที่ 5.5 (ก.) แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม (ข.) แหวนทรงกรวยวงรี



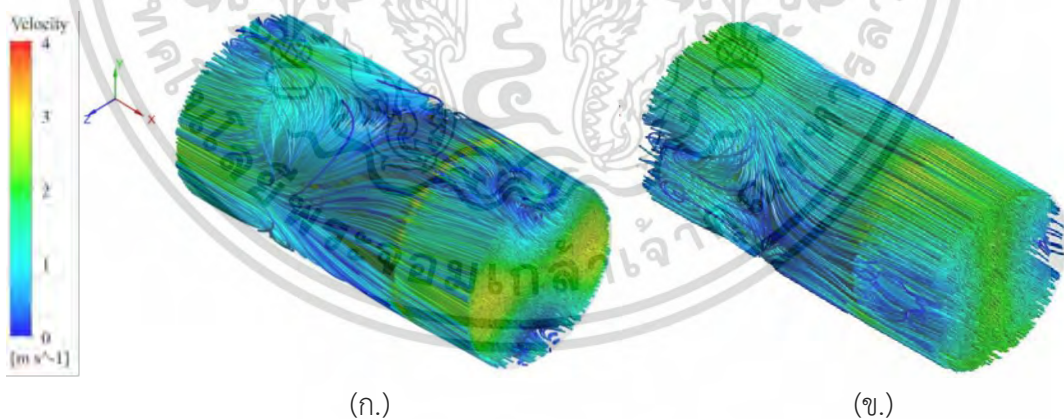
รูปที่ 5.5 ลักษณะของแหวนทรงกรวย (ก.) แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม (ข.) แหวนทรงกรวยวงรี

จากรูปที่ 5.6 แสดงเส้นกระแสการไหลบนระนาบขวางแนวการไหลเมื่อของไหลไหลผ่านแหวนทรงกรวยที่ค่า Re=3000 สำหรับ (ก.) แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม (ข.) แหวนทรงกรวยวงรี พบว่าเมื่ออากาศไหลผ่านแหวนทรงกรวยจะก่อให้เกิดการไหลหมุนควงขึ้น ซึ่งจากรูป 5.6 พบว่าแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม ส่งผลให้การกระจายตัวของเส้นกระแสการไหลเกิดการหมุนวนที่รุนแรงกว่าแหวนทรงกรวยวงรี ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 เส้นกระแสการไหล 2 มิติของแหวนทรงกรวย (ก.) แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม (ข.) แหวนทรงกรวยวงรี

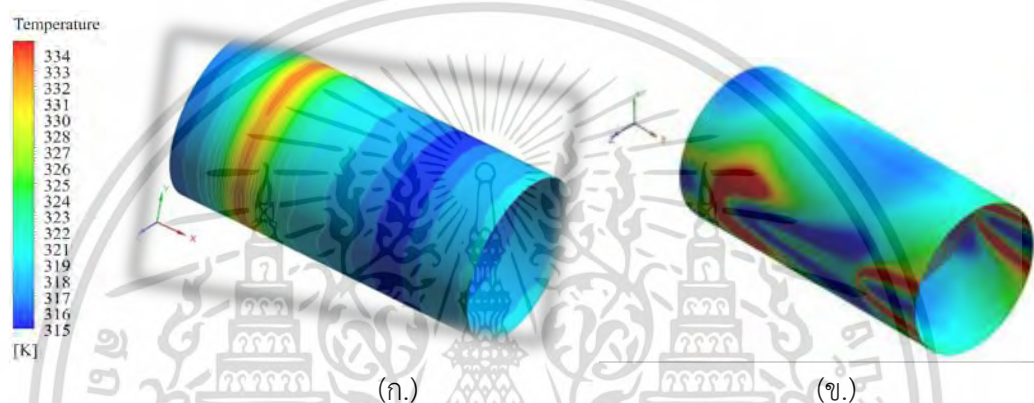
จากรูปที่ 5.7 แสดงเส้นกระแสการไหล 3 มิติของการไหลในท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมที่ $a_r=1.0$ $PR=2.0$ ที่ค่า $Re=3000$ เพื่อให้ให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลภายในท่อกลม สำหรับ (ก.) แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม (ข.) แหวนทรงกรวยวงรี พบว่าเมื่ออากาศไหลผ่านแหวนทรงกรวยทั้งสองแบบก่อให้เกิดการไหลหมุนวนขึ้น ซึ่งจากรูป 5.7 จะเห็นได้ว่าแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมส่งผลให้เส้นกระแสการไหลมีการไหลหมุนวนมากกว่าแหวนทรงกรวยแบบวงรี จะสังเกตเห็นลักษณะของเส้นกระแสการไหลของกรณีแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมมีความรุนแรงมากกว่าแหวนทรงกรวยวงรี เนื่องจากแหวนกรวยวงรีแบบดั้งเดิมส่งผลให้อากาศเย็นบริเวณกลางท่อและอากาศร้อนบริเวณผิวท่อผสมกันได้ดีกว่าแหวนทรงกรวยวงรีซึ่งเป็นผลมาจากการไหลหมุนวนหรือการกระจายตัวของเส้นกระแสการไหลที่รุนแรงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 เส้นกระแสการไหล 3 มิติที่ของแหวนทรงกรวย (ก.) แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม (ข.) แหวนทรงกรวยวงรี

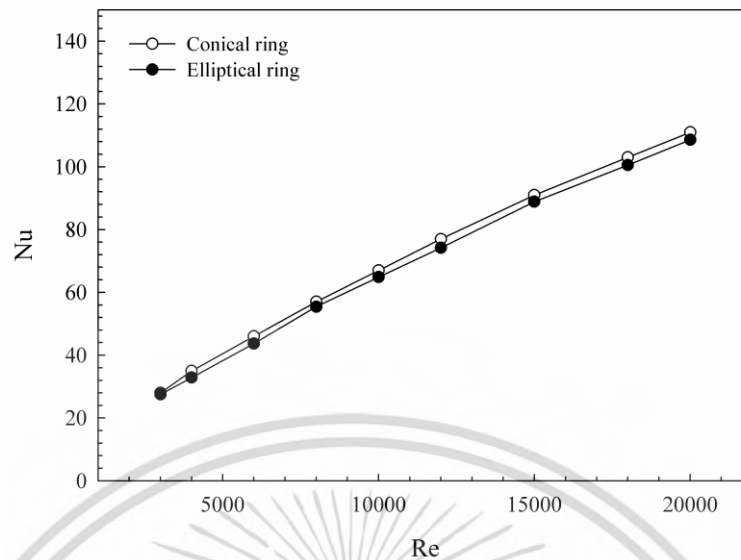
รูปที่ 5.8 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิบริเวณผนังท่อที่ $a_r=1.0$ $PR=2.0$ ที่ค่า $Re=3000$ สำหรับ (ก.) แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม (ข.) แหวนทรงกรวยวงรี เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิบริเวณผนังท่อสำหรับแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมจะเห็นได้ว่าบริเวณผนังท่อด้านบนของอากาศยังมีอุณหภูมิสูงซึ่งสังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดงบริเวณด้านบนของผนังท่อ และมีคอนทัวร์สีน้ำเงินบริเวณด้านข้างผลมาจากการปั่นป่วนบริเวณนั้นที่ที่มีความรุนแรงมากกว่าบริเวณด้านบนของท่อที่สุดเมื่อไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับแหวนทรงกรวยวงรีแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมยังให้ค่าสมรรถนะที่สูงกว่า เมื่อพิจารณาจากเส้นกระแสการไหลและการกระจายอุณหภูมิพบว่าเกิดการผสมผสานกันของอากาศบริเวณกลางท่อและบริเวณผิวท่อได้ดีซึ่งเป็นผลมาจากความปั่นป่วนหรือการกระจายตัวของเส้นกระแสการไหลที่รุนแรงมากขึ้นเป็นผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกับความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูงได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากคอนทัวร์สีเขียวและสีน้ำเงินที่มีมากขึ้นเมื่อใส่แหวนทรงกรวยทั้งสองแบบ แต่อย่างไรก็ตามแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมยังปรากฏคอนทัวร์สีแดงบริเวณด้านบนของผิวท่อยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อยจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ ในส่วนของกรวยวงรีก็ปรากฏคอนทัวร์สีแดงบริเวณด้านข้างของผิวท่อยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อยจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในบริเวณนั้นน้อยกว่าบริเวณอื่น

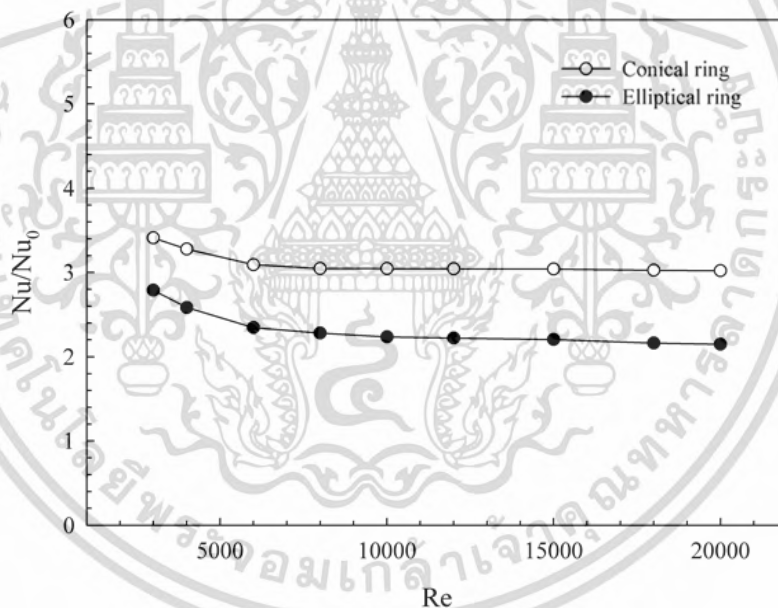


รูปที่ 5.8 การกระจายอุณหภูมิบริเวณผนังท่อของแหวนทรงกรวย (ก.) แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม (ข.) แหวนทรงกรวยวงรี

จากรูปที่ 5.9 - 5.10 แสดงความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สกรณีที่ใช้แหวนทรงกรวย $a=1.0$ $PR=2.0$ ที่ค่า $Re=3,000$ สำหรับ แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยวงรี เมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่ $Re=3000 - 20,000$ ท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม มีค่าเลขนัสเซิลท์ที่มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยวงรี และท่อเปล่าผิวเรียบ เนื่องจากเมื่อของไหลไหลผ่านแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมส่งผลให้เกิดการหมุนวนไปกระแทกที่ผนังท่อส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น และจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ Nu/Nu_0 มีค่าลดลงเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ส ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม และแหวนทรงกรวยวงรี

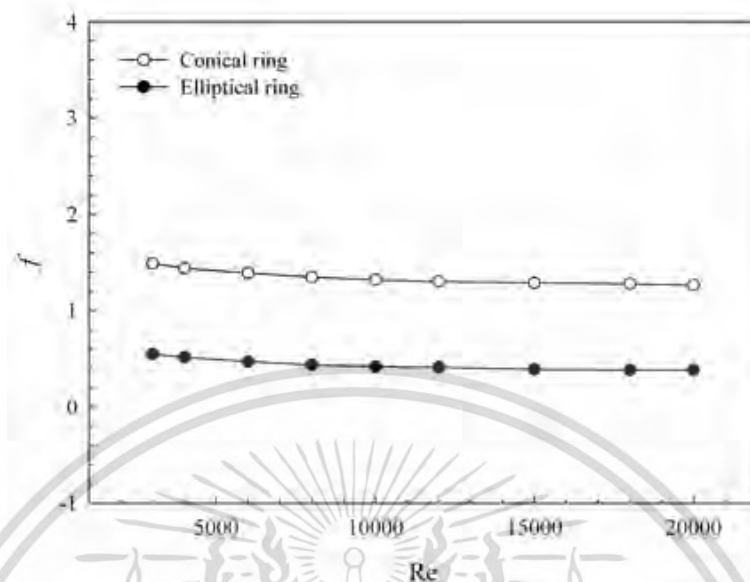


รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยวงรี

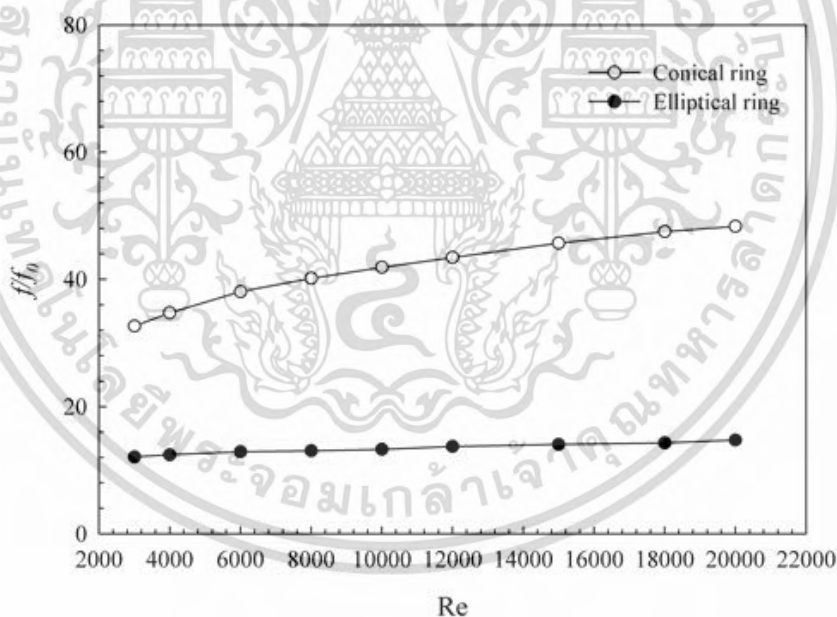
จากรูปที่ 5.11-5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์สำหรับท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม $a_r=1.0$ $PR=2.0$ และแหวนทรงกรวยวงรี $a_r=0.9$ $PR=2.0$ และพิจารณาที่ค่า $Re=3000 - 20,000$

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 1.01 ที่ $Re = 3000-20,000$ ของแหวนทรงกรวยทั้งสองแบบ และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง 1.71 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ $Re = 3000 - 20,000$ พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัว

ประกอบเสียดทานของแหวนทรงกรวยวงรีมีค่าน้อยกว่าแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 5.12



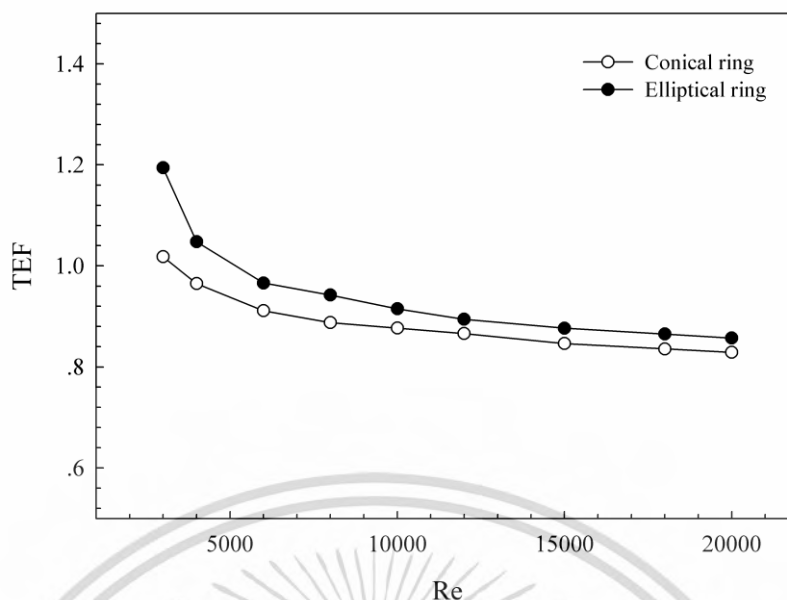
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยวงรี



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยวงรี

จากรูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยวงรี ซึ่งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมพิจารณาที่ $a_r=1.0$ $PR=2.0$ และแหวนทรงกรวยวงรี $a_r=0.9$ $PR=2.0$ ที่ค่า $Re=3000 - 20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



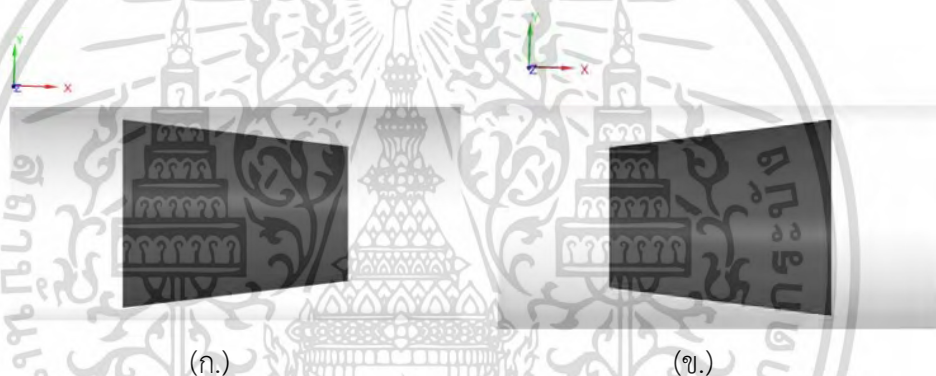
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบตั้งเดิมและแหวนทรงกรวยวงรี

เมื่อวิเคราะห์จากรูปที่ 5.13 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 0.82 - 1.02 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ $Re = 3000 - 20,000$ ของแหวนทรงกรวยแบบตั้งเดิมและแหวนทรงกรวยวงรีมีค่าอยู่ในช่วง 0.89 - 1.19 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ $Re = 3000 - 20,000$ ละพบว่าแหวนทรงกรวยวงรีแบบตั้งเดิมให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าแหวนทรงกรวยแบบวงรี

พิจารณาจากรูปที่ 5.13 ข้างต้นพบว่า การใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณผนังท่อได้มากขึ้นแต่ในกรณีแรกที่ศึกษาคือศึกษารูปแบบแหวนทรงกรวยแบบตั้งเดิมพิจารณาที่ $a_r=1.0$ $PR=2.0$ ยังให้ประสิทธิภาพไม่สูงมากจึงมีการปรับค่า a_r เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นกว่าแหวนทรงกรวยวงรีแบบตั้งเดิม จึงเป็นที่มาของการปรับค่า a_r ของแหวนทรงกรวยเพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทานและให้เกิดกระแสการไหลหมุนวนไปกระทบกับผนังท่อจะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวท่อได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใส่แหวนทรงกรวยทั้งสองกรณียังมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ อันเนื่องมาจากค่าการถ่ายเทความร้อนที่มีค่าน้อยและค่าตัวประกอบเสียดทานที่ยังค่อนข้างสูง ทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้ไม่สูงเท่าไร ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาอิทธิพลการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบอื่นๆและศึกษาอิทธิพลของระยะพิตช์ ต่อไปเพื่อเพิ่มค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลง เพื่อเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

5.2.2 อิทธิพลของการจัดวางแหวนทรงกรวย

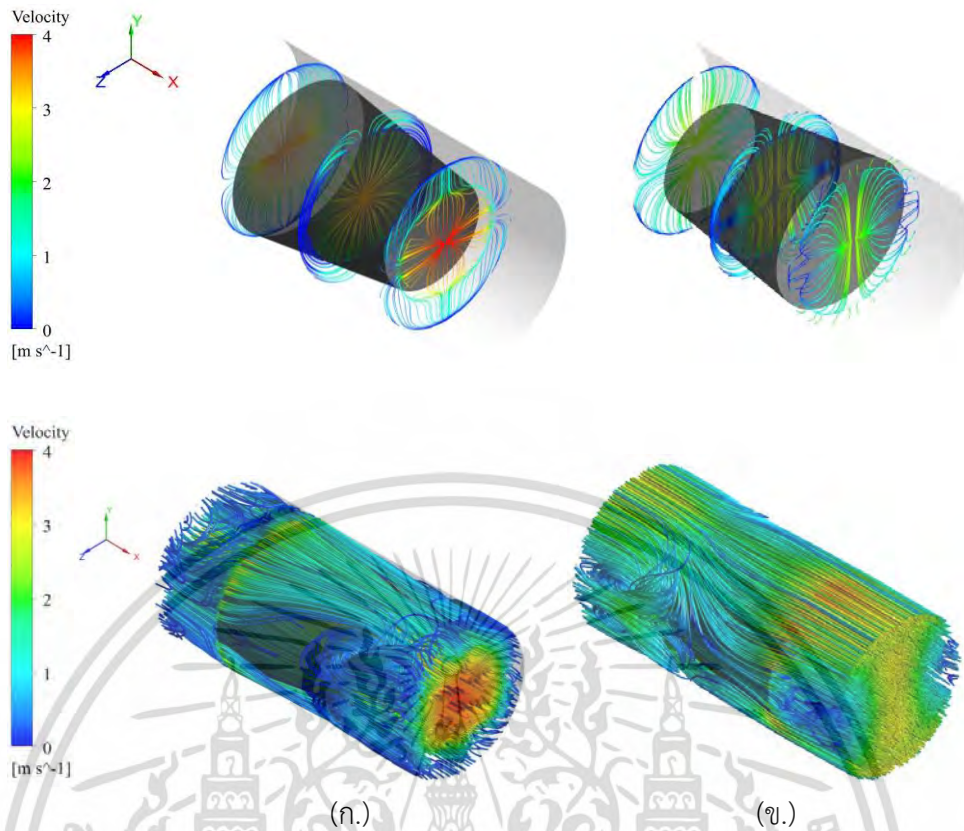
จากการศึกษาที่ผ่านมาเป็นการศึกษาอิทธิพลของของรูปแบบแหวนทรงกรวยเป็นผลให้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับตำแหน่งการจัดวางที่ส่งผลไปถึงพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อน และในส่วนี้จะทำการนำเสนอในส่วนของอิทธิพลของการจัดวางแหวนทรงกรวยได้นำเสนอกรณีที่ 1 กรวยวงรีแบบ(converging conical ring, CER) กรณีที่ 2 แหวนกรวยวงรีแบบ(diverging conical ring, DER) ที่ค่า $a_r=0.9$ ที่ค่า $Re=3000$ และ $PR=2.0$ โดยมีการนำเสนอผลจากอิทธิพลของการจัดวาง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการไหลทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านแหวนทรงกรวยทั้งสองแบบ ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการไหลซึ่งแสดงในรูปของคอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิส่วนที่ 3 นำเสนอในส่วนของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลท์, ค่าตัวประกอบเสียดทานกับค่าเลขเรย์โนลด์ส ดังแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อ ก.converging Elliptical tical ring,CER
ข.diverging Elliptical tical ring,DER

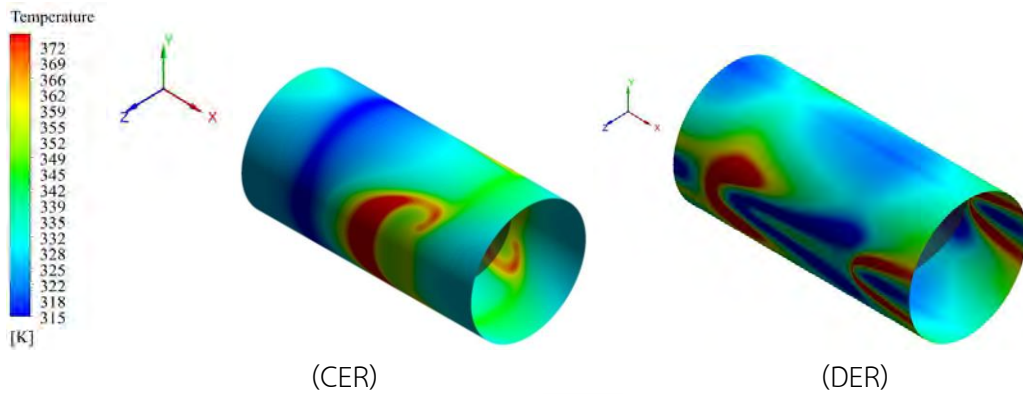
ในส่วนของเส้นกระแสการไหลจะแสดงในรูปแบบของเส้นกระแสการไหล 2 มิติและเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลโดยทั่วไปของการไหลผ่านแหวนทรงกรวยภายในท่อ โดยทำการพล็อตเปรียบเทียบที่ PR เดียวกัน a_r เดียวกัน ที่การจัดวางที่ต่างกันสองกรณี คือ การจัดวางแบบ CER และ DER ซึ่งเส้นกระแสการไหล 2 มิติจะทำให้เห็นการหมุนวนย่อยๆที่เกิดขึ้นขณะของไหลไหลผ่านแหวนทรงกรวย ส่วนเส้นกระแสการไหล 3 มิติ จะทำให้เห็นความรุนแรงของการปั่นป่วนเมื่อของไหลไหลผ่านแหวนทรงกรวย โดยเส้นกระแสการไหลทั้งสองรูปแบบนี้จะแสดงไว้ในรูปที่ 5.15

รูปที่ 5.15 เส้นกระแสการไหล 2 มิติ และ 3 มิติ ที่ค่า $a_r=0.9$ ที่ค่า $PR=2.0$ และ $Re=3000$ สำหรับการจัดวางแบบ CER และ DER พบว่าเมื่ออากาศไหลแหวนทรงกรวยจะก่อให้เกิดความปั่นป่วนขึ้น ซึ่งรูปที่ 5.15 พบว่ากรณีการจัดวางแบบ CER จะมีการปั่นป่วนที่รุนแรงน้อยที่สุด เมื่อกับกรณีการจัดวางแบบ DER ซึ่งส่งผลให้การปั่นป่วนมีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.15



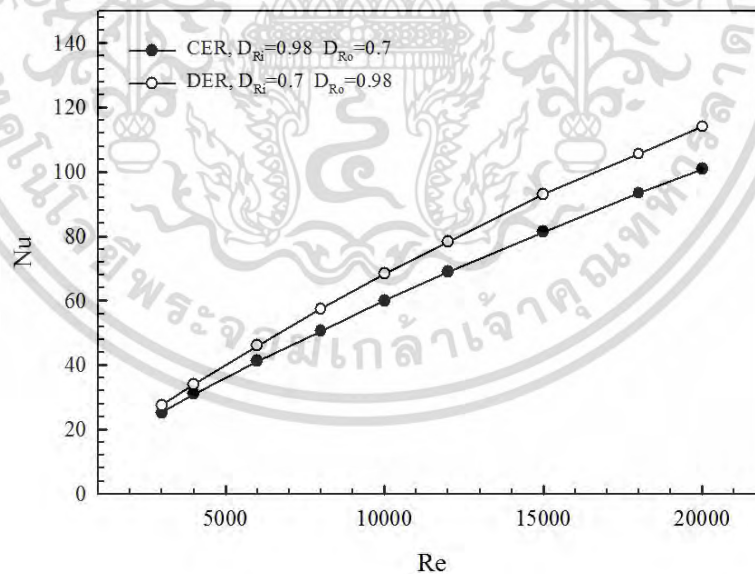
รูปที่ 5.15 เส้นกระแสการไหล 2 มิติ และ 3 มิติสำหรับการจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อ
ก.converging Elliptical ring,CER ข.diverging Elliptical ring,DER

รูปที่ 5.16 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิที่ผิวท่อ ดังแสดงในรูปที่ 5.16 ซึ่งนำเสนอการ จัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อ ก.converging Elliptical ring,CER ข.diverging Elliptical ring,DER ที่ค่า $\alpha_r=0.9$ ที่ค่า $Re=3000$ และ $PR=2.0$ สำหรับกรณีการจัดวางแบบ CER และกรณีการจัดวางแบบ DER เมื่อพิจารณาค่าการกระจายอุณหภูมิที่ผิวท่อ กรณีการจัดวางแบบ CER จะเห็นได้ว่าบริเวณผนังท่อด้านหลังกรวยอากาศยังมีอุณหภูมิสูงซึ่งสังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดง ส่วนผนังท่อด้านบริเวณทางเข้านั้นจะสังเกตเห็นได้ว่าอากาศบริเวณผนังท่อเริ่มมีอุณหภูมิต่ำลงแสดงว่าบริเวณนั้นเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีซึ่งสังเกตได้จากคอนทัวร์สีฟ้าและสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นผลมาจากความปั่นป่วนที่มีความรุนแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีการจัดวางแบบ DER ดังแสดงในรูปที่ 5.16 แต่เมื่อพิจารณาที่การจัดวางแบบ DER พบว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำหรือคอนทัวร์สีฟ้าหรือสีน้ำเงินเริ่มมีการกระจายไปยังบริเวณใกล้เคียงท่อมากขึ้นอันเป็นผลมาจากการปั่นป่วนที่มีความรุนแรงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังปรากฏอากาศที่อุณหภูมิสูงหรือคอนทัวร์สีแดงอยู่บริเวณผนังท่อด้านข้าง และมีคอนทัวร์สีแดงเกิดขึ้นน้อยกว่าการจัดวางแบบ CER อันเนื่องมาจากมีการปั่นป่วนที่รุนแรงที่กว่า



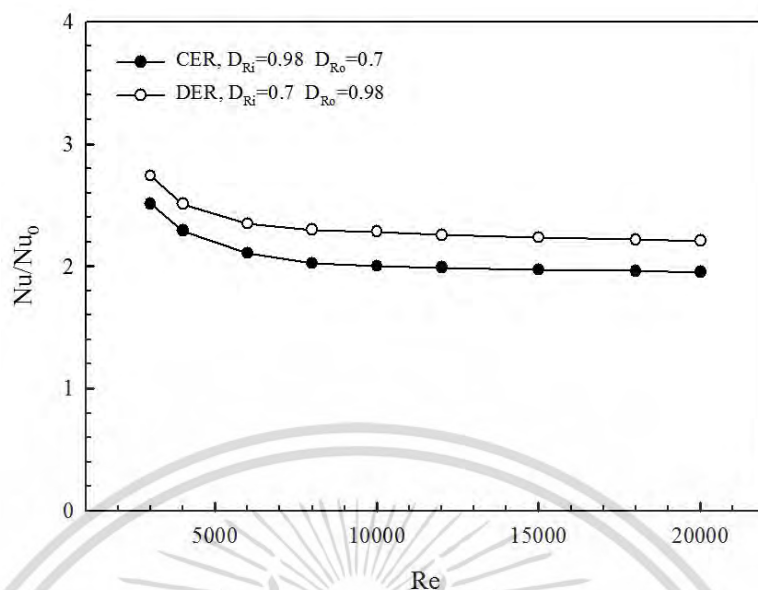
รูปที่ 5.16 การกระจายอุณหภูมิบริเวณผนังท่อสำหรับการจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อ
ก. converging Elliptical ring, CER ข. diverging Elliptical ring, DER

จากรูปที่ 5.17-5.18 แสดงความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์และอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สกรณที่ใส่แหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER และ DER ที่ค่า $a_r=0.9$ $PR=2.0$ และ $Re=3000$ เมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่ $Re=3000-20,000$ ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ DER ที่มีค่าเลขนัสเซิลท์สูงกว่าเมื่อเทียบกับท่อกลมที่แหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER และท่อเปล่าผิวเรียบ เนื่องจากเมื่อของไหลไหลแหวนทรงกรวย ส่งผลให้การไหลเกิดการหมุนควงที่มีความรุนแรง เกิดกระแสมันควงไปกระทบที่ผนังท่อส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น และจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ Nu/Nu_0 มีค่าลดลงเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ส



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อ
ที่การจัดวางแบบ CER และ DER

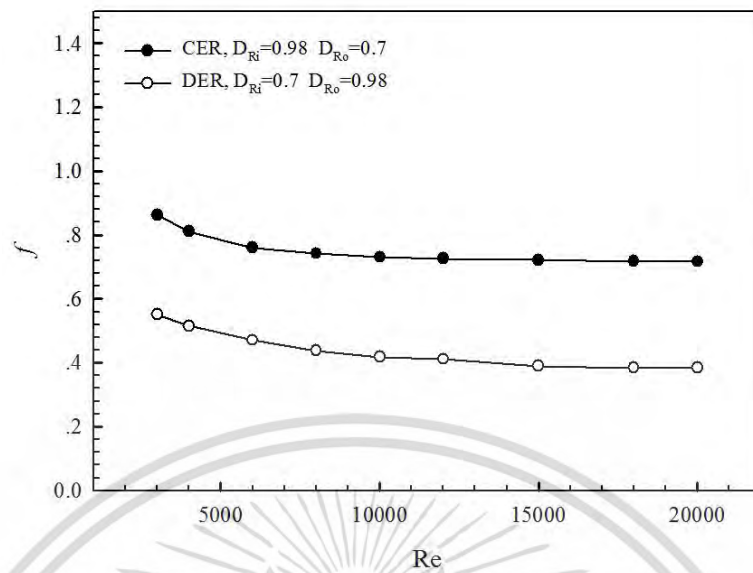
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



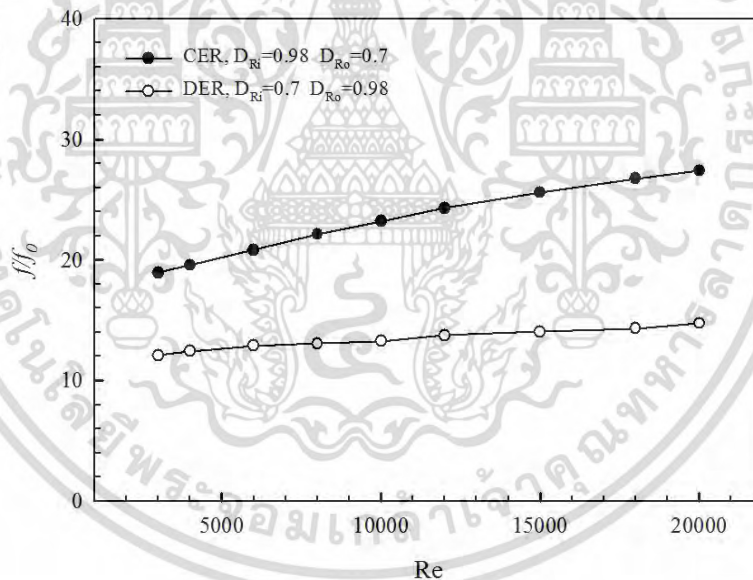
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์อัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวย ภายในท่อ ที่การจัดวางแบบ CER และ DER

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER และ DER ซึ่งพิจารณาที่ค่า $a_r=0.9$ $PR=2.0$ ในช่วง $Re=3000 - 20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.19 - 5.20

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง $0.71 - 1.12$ พิจารณาที่ค่า $Re=3000 - 20,000$ ของแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER และ DER ที่ใส่ภายในท่อกลม และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง $18.94 - 38.85$ เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ พิจารณาที่ค่า $Re=3000 - 20,000$ ของแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER และ DER ที่ใส่ภายในท่อกลมเช่นเดียวกัน จากกราฟจะเห็นได้ชัดว่าแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ DER ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่สูงกว่า กรณีปักแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่ต่ำกว่า



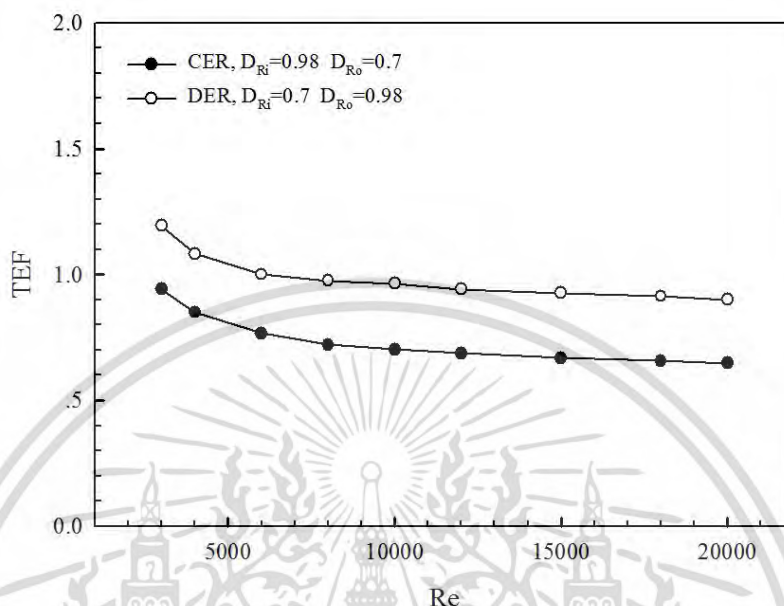
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวย ภายในท่อ ที่การจัดวางแบบ CER และ DER



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อ ที่การจัดวางแบบ CER และ DER

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของปี แหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER และ DER ที่ใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่ค่า $a_r=0.9$ $PR=2.0$ ในช่วง $Re=3000 - 20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.21



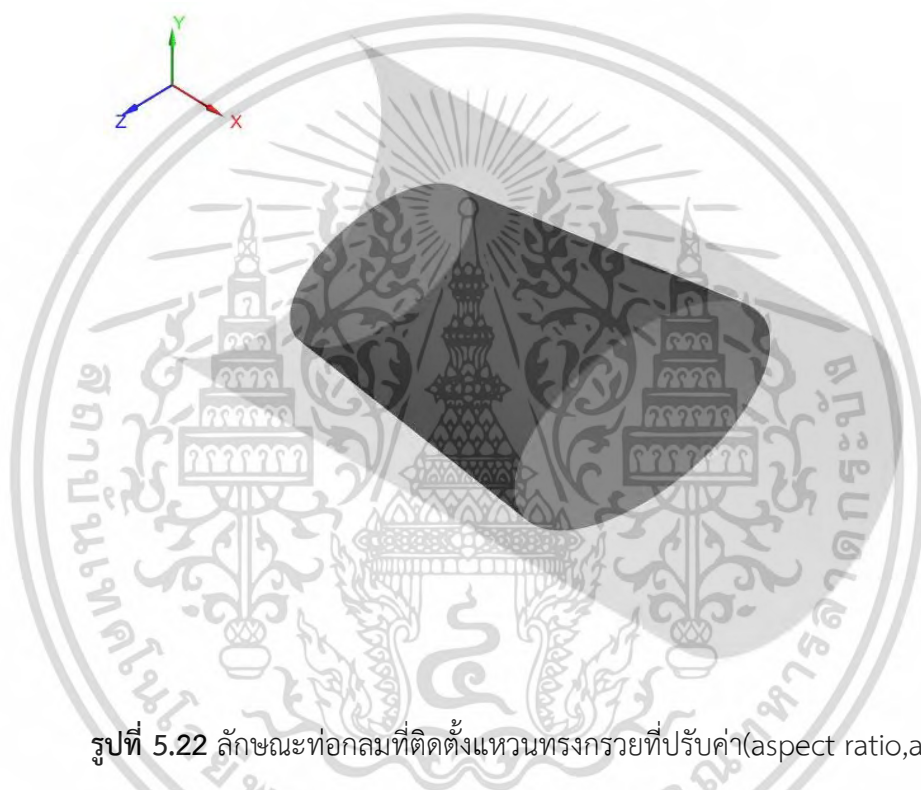
รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวย ภายในท่อ ที่การจัดวางแบบ CER และ DER

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 0.65-0.99 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบพิจารณาที่ค่า $Re=3000 - 20,000$ ของใส่แหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER และ DER และพบว่าแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ DER ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER เนื่องจากเมื่อใส่แหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ DER ภายในท่อกลมทำให้เกิดกระแสการไหลที่รุนแรงกว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER จึงส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูง และค่าตัวประกอบเสียดทานก็สูงเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาที่สมรรถนะเชิงความร้อนพบว่าแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ DER ให้ค่าสมรรถนะสูงกว่าแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER

จากการพิจารณารูปแบบของแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER และ DER ข้างต้น พบว่าการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณผนังได้มากขึ้นแต่ เนื่องจากการแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ DER มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงกว่าแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER อันเนื่องมาจากค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่ามากและค่าตัวประกอบเสียดทานที่เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ DER ที่ได้มีค่าสูงกว่าแหวนทรงกรวยที่การจัดวางแบบ CER แต่ค่าที่ได้ยังไม่สูงมากนักจึงได้นำเอารูปแบบการจัดวางไปเพื่อพัฒนาและศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์และมุมปะทะการไหล เพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทานให้มีค่าลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

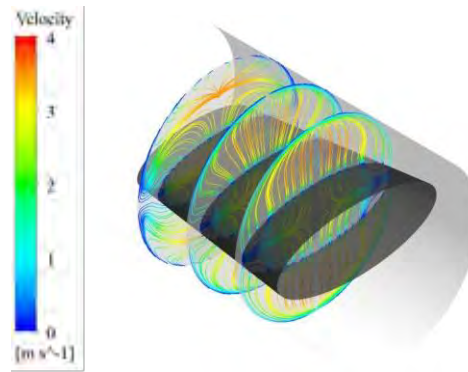
5.2.3 อิทธิพลของการปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, a_r)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลของมุมปะทะและระยะพิตช์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลได้นำเสนอการติดตั้งแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่ $a_r=0.4, 0.6,$ และ 0.8 ที่ค่า $Re=3000-20,000$ ที่ค่า $PR=1.5$ และ 2.0 โดยมีการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ a_r ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการไหลทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านแหวนทรงกรวย ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการไหลซึ่งแสดงในรูปของคอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิ

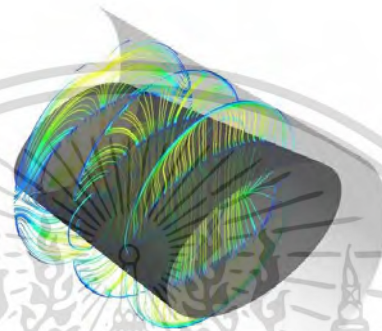


รูปที่ 5.22 ลักษณะท่อกลมที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยที่ปรับค่า (aspect ratio, a_r)

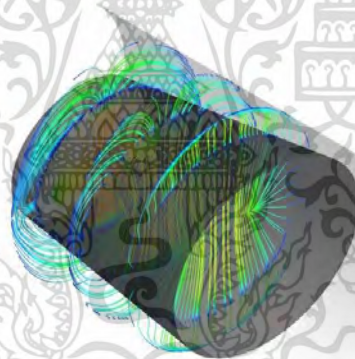
รูปที่ 5.23 แสดงถึงเส้นกระแสไหล 2 มิติ และ 3 มิติ ท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยปรับค่า (aspect ratio, a_r) พิจารณาที่ $a_r=0.4, 0.6$ และ 0.8 ที่ค่า $Pr=1.5$ ที่ค่า $Re=3000$ พบว่าเมื่อของไหลไหลผ่านแหวนกรวยวงรีทำให้กระแสการไหลเกิดการไหลหมุนควงมากขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนจึงเป็นผลต่อเนื่องให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การติดตั้งแหวนกรวยวงรีแบบปรับ (aspect ratio, a_r) ยังส่งผลทำให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงกว่าแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมแต่ค่าที่ได้ยังไม่เพียงพอจึงมีการปรับปรุงต่อไปอีก เพื่อให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงขึ้น



(ก.)



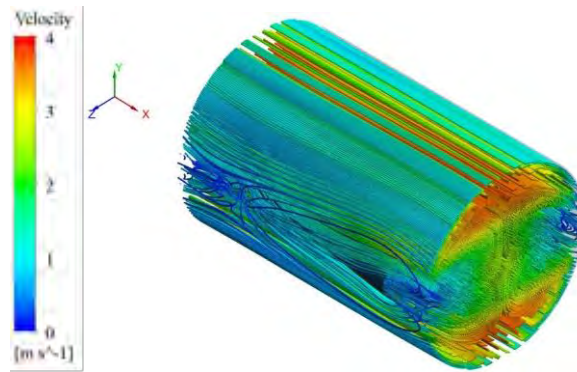
(ข.)



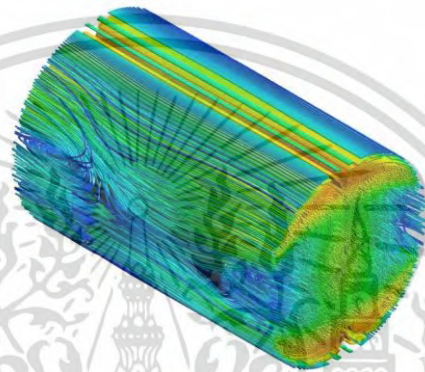
(ค.)

รูปที่ 5.23 เส้นกระแสการไหลสองมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r=0.4, 0.6$ และ 0.8 ที่ค่า $PR=1.5$ $Re=3000$

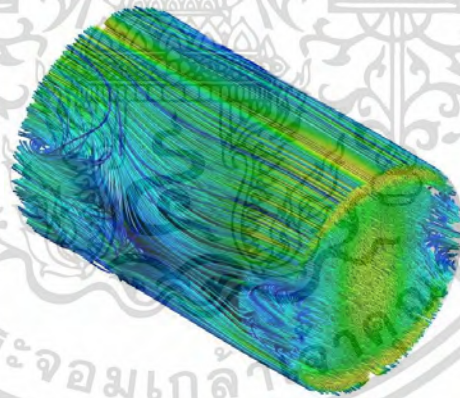
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.)



(ข.)



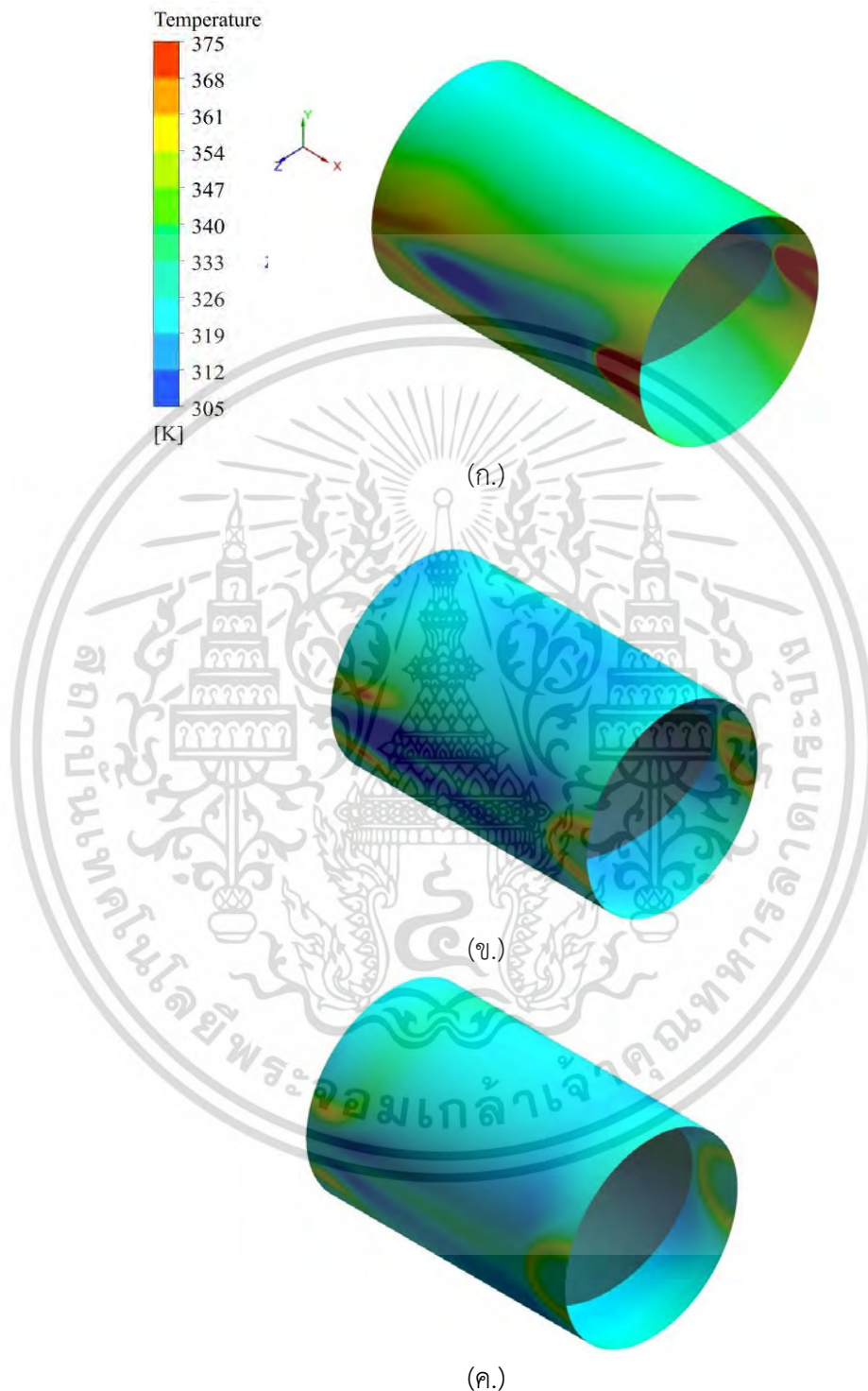
(ค.)

รูปที่ 5.24 เส้นกระแสการไหลสามมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r=0.4, 0.6$ และ 0.8 ที่ค่า $PR=1.5$ $Re=3000$

จากรูปที่ 5.24 แสดงถึงการกระจายของอุณหภูมิบริเวณผิวท่อสำหรับท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r=0.4, 0.6$ และ 0.8 ที่ค่า $PR=1.5$ $Re=3000$ พบว่าการไหลหมุนควงที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งแหวนกรวยที่ปรับค่า a_r ส่งผลให้เกิดการผสมกันได้ดีขึ้นระหว่างอากาศเย็นของของไหลภายในท่อกับอากาศร้อนที่ผิวท่อ จะส่งผลให้ของไหลที่มีอุณหภูมิเย็นที่บริเวณกลางท่อกระจายไปรับความร้อนที่ผิวท่อทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นที่บริเวณผนังท่อ ซึ่งที่ $a_r=0.6$ $PR=1.5$ ที่ค่า $Re=3000$ พบว่ามีการผสมกันของของไหลที่ดีที่สุด ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่ากรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

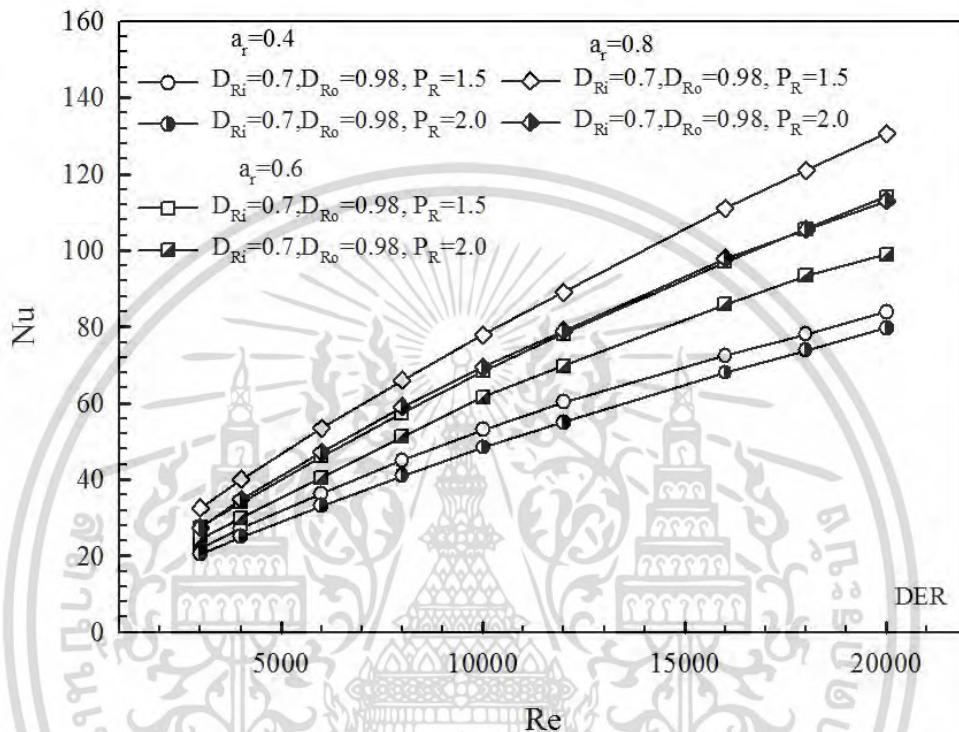
แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมและกรวยวงรีที่ปรับค่า $a_r=0.4$ และ 0.8 จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ $a_r=0.6$ จะเห็นคอนทัวร์สีน้ำเงินเยอะกว่ากรณีอื่นแสดงให้เห็นว่าเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่ากรณีอื่น



รูปที่ 5.25 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r=0.4$, 0.6 และ 0.8 ที่ค่า $PR=1.5$ $Re= 3000$

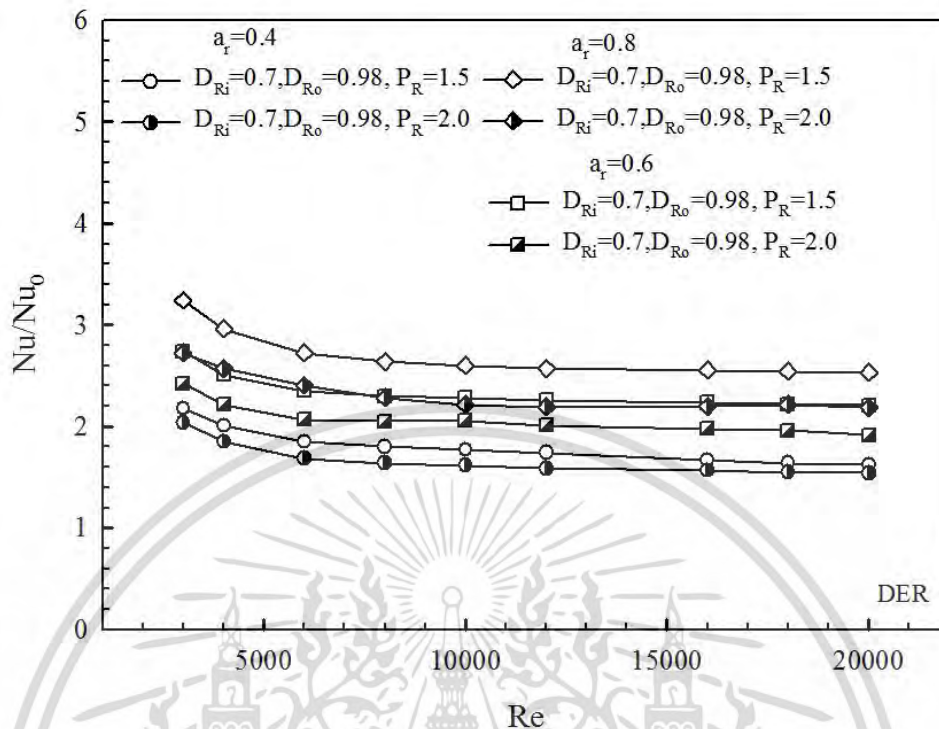
จากรูปที่ 5.26 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ratio, a_r) ที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อ a_r ต่ำส่งผลให้กระแสการไหลมีการหมุนควงน้อยลงส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำ เมื่อ a_r เพิ่มสูงขึ้นก็ส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้มีค่าต่ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่า a_r ที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงคือ $a_r=0.6$ $P_R=1.5$ จะมีการหมุนควงที่รุนแรงที่สุด ส่งผลให้กระแสของของไหลสามารถไหลไปกระแทกกับผนังของท่อเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากกว่ากรณีอื่น



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวย ที่ปรับค่า $a_r=0.4, 0.6$ และ 0.8 ที่ค่า $P_R=1.5$ และ 2.0

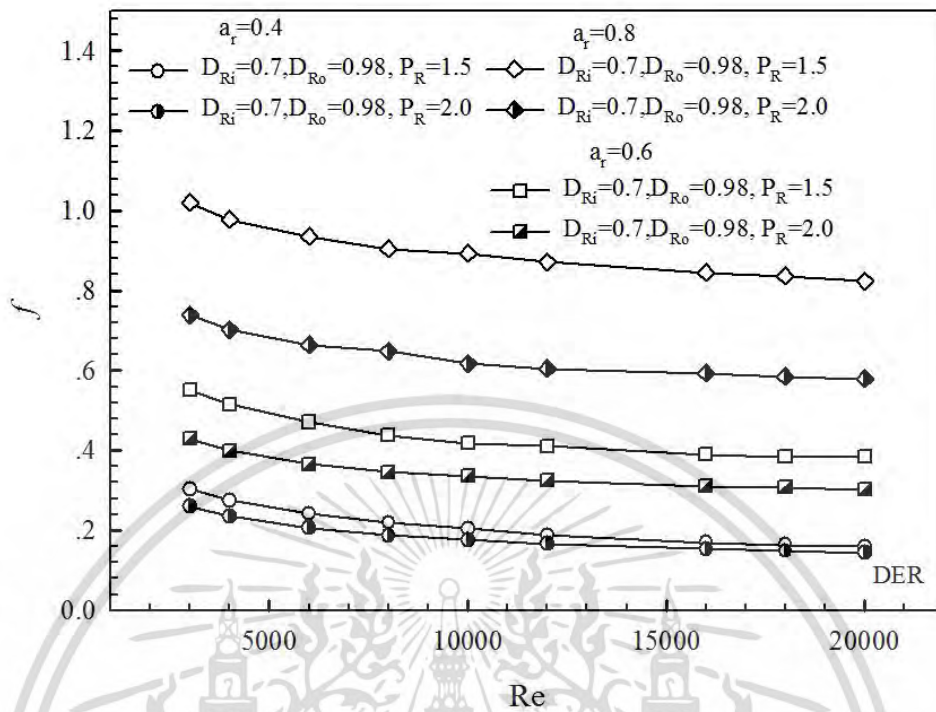
จากรูปที่ 5.27 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มีค่าลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มมากขึ้น และพบว่าที่ค่า $a_r=0.6$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับ $a_r=0.4$ และ 0.8 โดยสังเกตจากค่าเลขนัสเซิลท์ที่ลดลงเมื่อค่า a_r เพิ่มขึ้น



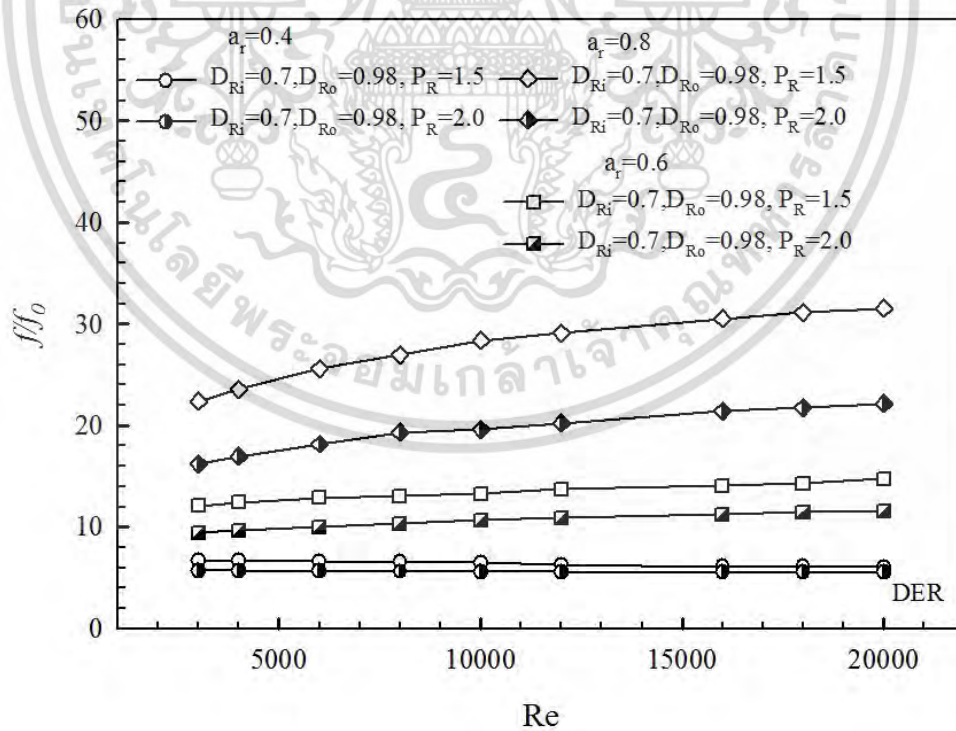
รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r=0.4, 0.6$ และ 0.8 ที่ค่า $P_R=1.5$ และ 2.0

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (ff_0) กับเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของแหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า $a_r=0.4, 0.6$ และ 0.8 ที่ค่า $P_R=1.5$ และ 2.0 ที่ $Re=3000-20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.28 - 5.29

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง $0.14 - 1.02$ ที่ค่า $Re=3000 - 20,000$ ของแหวนทรงกรวยที่ปรับค่า (aspect ratio, a_r) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง $5.51 - 31.51$ เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ พิจารณาที่ค่า $Re=3000 - 20,000$ จะเห็นได้ว่าแหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r=0.6$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่กว่ากรณีที่ $a_r=0.4$ และ 0.8 จึงมีการพัฒนาปรับปรุงรูปร่างเพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทาน เพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนให้สูงขึ้น ด้วยรูปร่างที่เหมาะสมดังนั้นจึงมีการปรับปรุงรูปร่างจากรูปแบบกรวยแบบดั้งเดิมมาเป็นรูปแบบกรวยวงรี โดยมุ่งหวังที่จะลดค่าตัวประกอบเสียดทาน เพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนให้สูงขึ้น



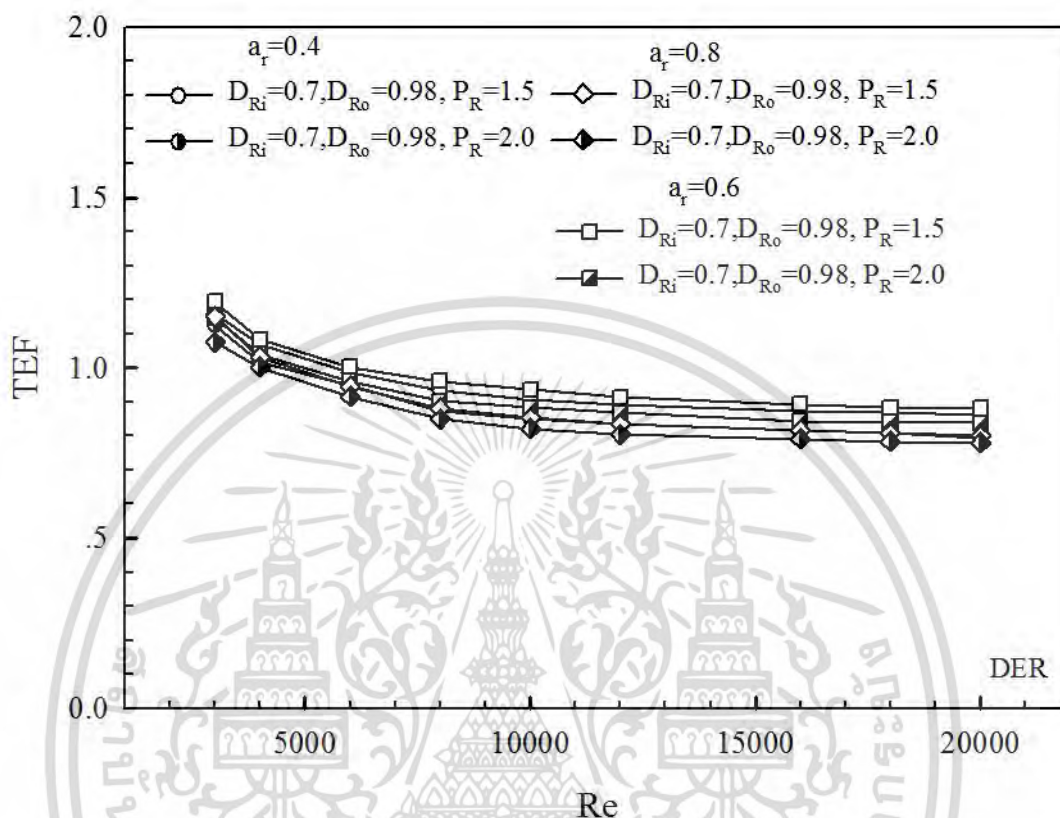
รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_f=0.4, 0.6$ และ 0.8 ที่ค่า $P_R=1.5$ และ 2.0



รูปที่ 5.29 อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_f=0.4, 0.6$ และ 0.8 ที่ค่า $P_R=1.5$ และ 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของปีแหวนทรงกรวยภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่ค่าเปลี่ยนค่า $a_r=0.4, 0.6$ และ 0.8 ที่ค่า $P_R=1.5$ และ 2.0 ที่ $Re=3000-20,000$ ดังแสดงในรูปที่ 5.30

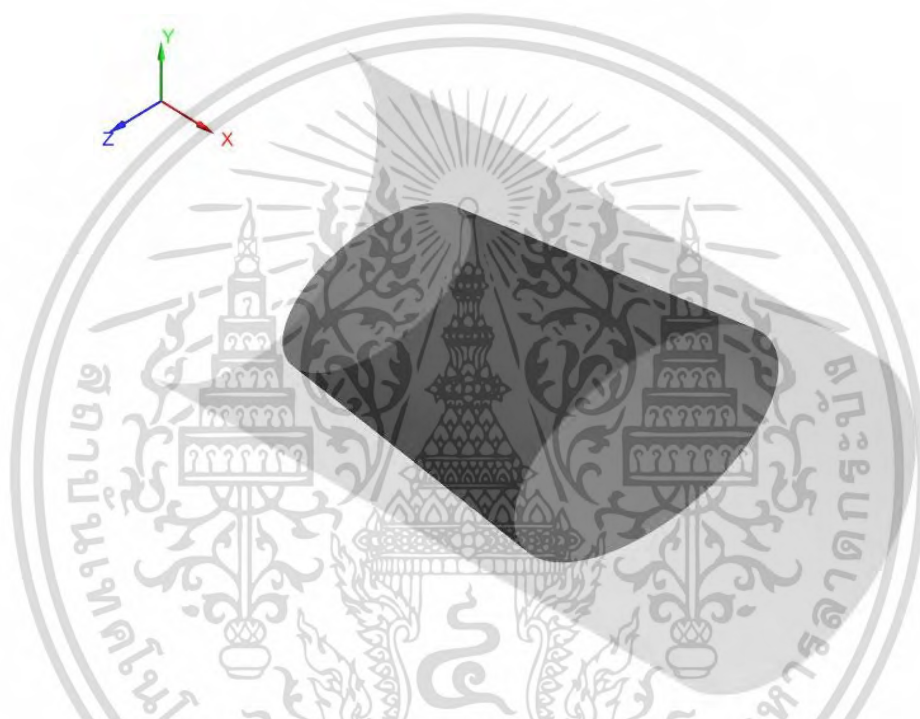


รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์สมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับค่า $a_r=0.4, 0.6$ และ 0.8 ที่ค่า $P_R=1.5$ และ 2.0

จากรูปที่ 5.30 แสดงค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อน (NU/NU_0) กับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) ที่เกิดขึ้นที่กำลังขับเคลื่อนเดียวกัน ในท่อที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยที่ระยะพิตซ์ต่างกัน จากการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลข สังเกตเห็นว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นสำหรับทุกระยะพิตซ์เนื่องจากความเร็วจากการไหลยังไม่พอต่อการผสมกันระหว่างอากาศร้อนที่บริเวณผนังท่อกับอากาศเย็นที่บริเวณตรงกลางท่อ โดยผ่านท่อที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยกรณี $a_r=0.6$ ที่ $P_R=1.5$ ให้ค่า TEF ดีที่สุดเท่ากับ 1.03 ที่ $Re=3000$

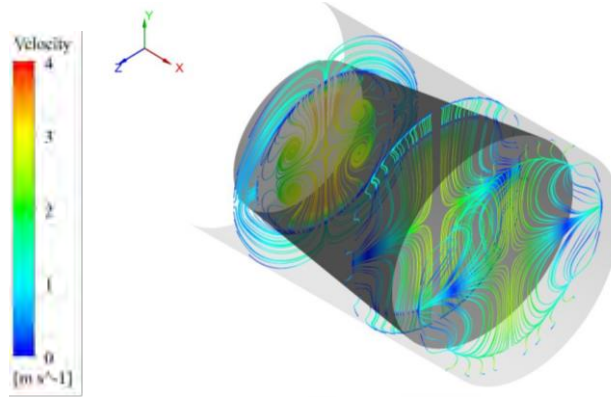
5.2.4 อิทธิพลของระยะพิตช์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลของมุมปะทะและระยะพิตช์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลได้นำเสนอการติดตั้งแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่ $PR=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $Re=3000-20,000$ ที่ค่า $a_r=0.6$ โดยมีการนำเสนอผลจากอิทธิพลของ PR ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการไหลทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลผ่านแหวนทรงกรวย ส่วนที่ 2 นำเสนอการถ่ายเทความร้อนหรือพฤติกรรมการไหลซึ่งแสดงในรูปของคอนทัวร์หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิ

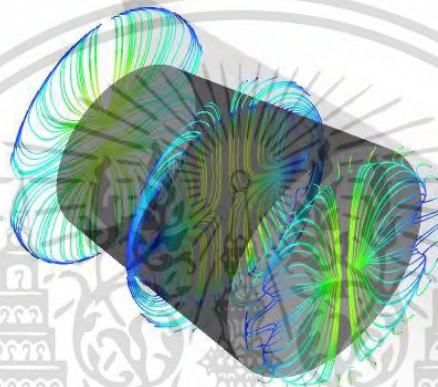


รูปที่ 5.31 แสดงลักษณะของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวย

รูปที่ 5.32 แสดงถึงเส้นกระแสไหล 2 มิติ และ 3 มิติ ท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวย พิจารณาที่ $a_r=0.6$ ที่ $PR=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $Re=3000$ พบว่าเมื่อของไหลไหลผ่านแหวนทรงกรวยวงรีทำให้กระแสน้ำเกิดการไหลหมุนวนมากขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนจึงเป็นผลต่อเนื่องให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การติดตั้งแหวนทรงกรวยยังส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



(ก.)



(ข.)

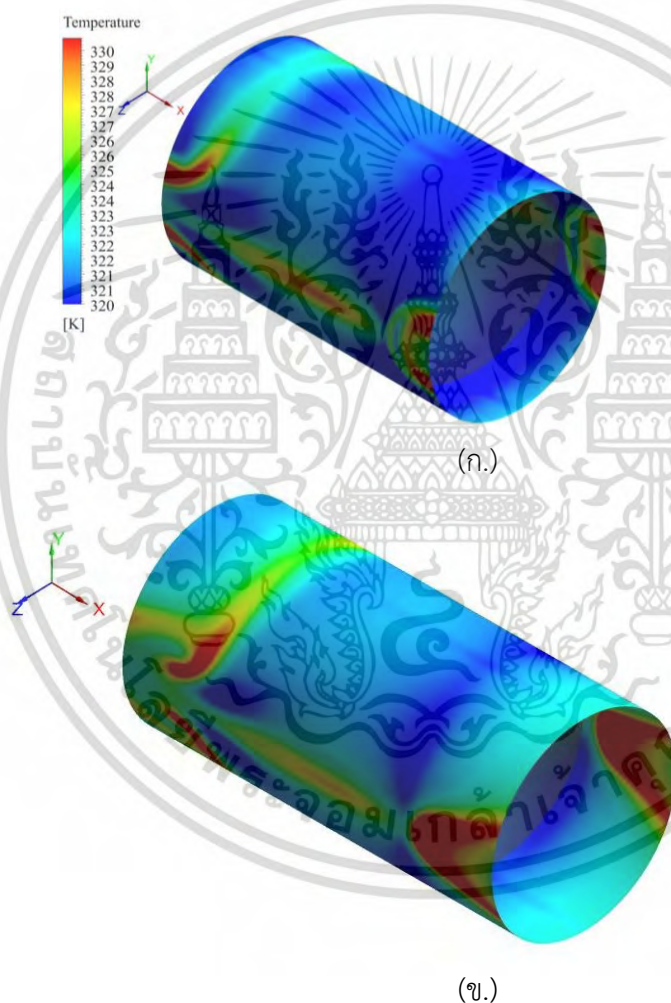


(ค.)

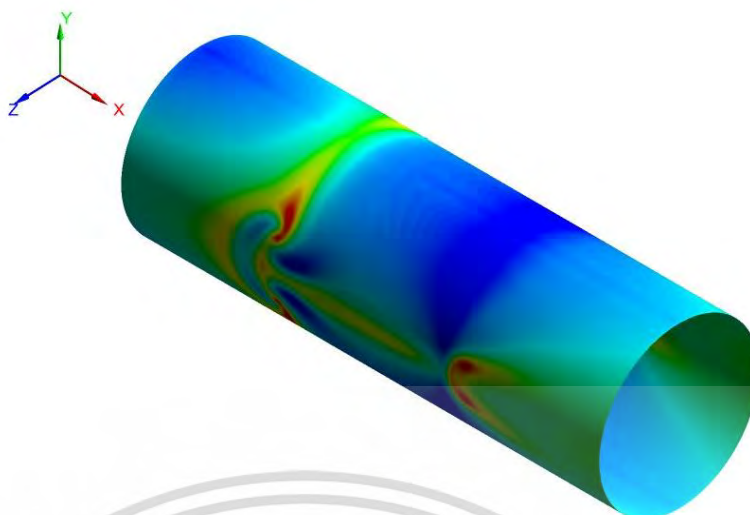
รูปที่ 5.32 เส้นกระแสการไหลสองมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า
(ก.) $PR=1.5$ (ข.) $PR=2.0$ และ (ค.) $PR=2.5$ ที่ค่า $\alpha_r=0.6$ ที่ $Re=3000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.33 แสดงถึงการกระจายของอุณหภูมิบริเวณผิวท่อสำหรับท่อที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยรีที่ค่า $P_R=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 พบว่าการไหลหมุนควงที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งแหวนกรวยรีส่งผลให้เกิดการผสมกันได้ดีขึ้นระหว่างอากาศเย็นของของไหลภายในท่อกับอากาศร้อนที่ผิวท่อ ท่อที่มีการติดตั้งแหวนกรวยรี การหมุนควงที่เกิดขึ้นจากการไหลจะส่งผลให้ของไหลที่มีอุณหภูมิเย็นที่บริเวณกลางท่อกระจายไปรับความร้อนที่ผิวท่อทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นที่บริเวณผนังท่อ ซึ่งที่ $a_r=0.6$ $PR=1.5$ ที่ค่า $Re=3000$ พบว่ามีการผสมกันของของไหลดีที่สุดซึ่งแสดงให้เห็นในรูปภาพของการกระจายอุณหภูมิจะสังเกตเห็นว่าที่ $P_R=1.5$ คอนทัวร์อุณหภูมิจะเป็นสีน้ำเงินเยอะกว่าบริเวณที่เป็นสีแดงและ $P_R=1.5$ ยังมีคอนทัวร์สีน้ำเงินมากกว่ากรณีที่ $P_R= 2.0, 2.5$ และ 3.0 เนื่องจากความรุนแรงของกระแสที่รุนแรงกว่าจึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าส่งผลให้เห็นเป็นคอนทัวร์สีน้ำเงิน



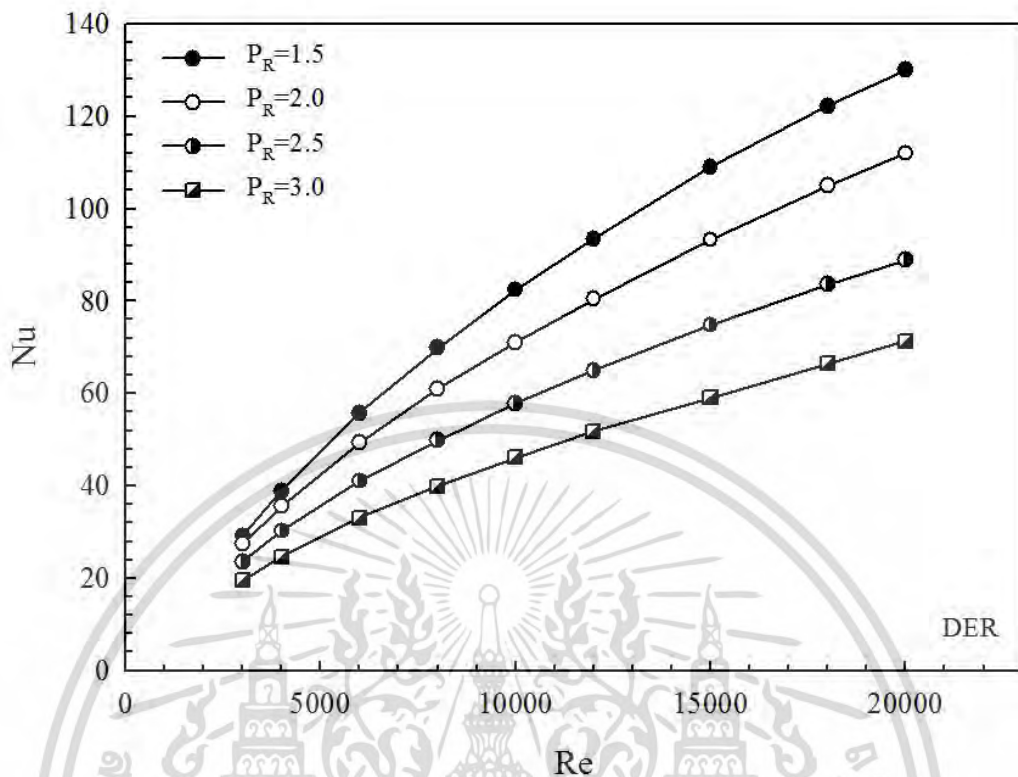
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค.)

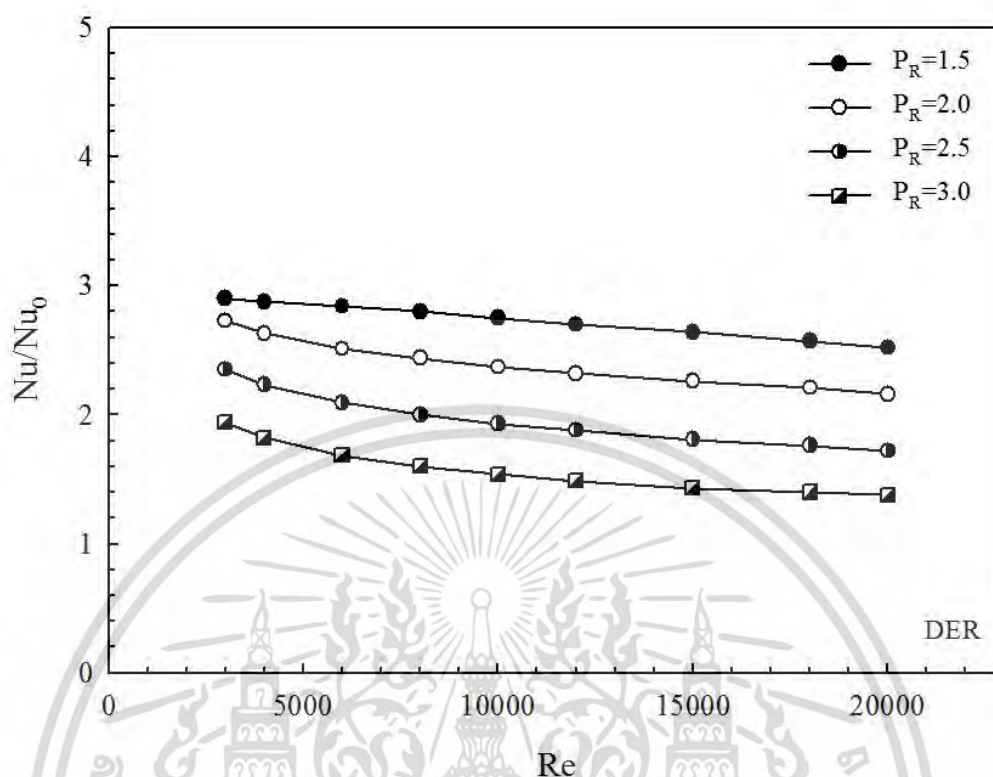
รูปที่ 5.33 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า
(ก.) $PR=1.5$ (ข.) $PR=2.0$ และ (ค.) $PR=2.5$ ที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ $Re=3,000$

จากรูปที่ 5.34 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่ปรับระยะพิตช์ที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อระยะพิตช์ (PR) เพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสการไหลมีการหมุนควงน้อยลงโดยใน กรณี $PR=1.5$ จะมีการหมุนควงที่รุนแรงที่สุด ส่งผลให้กระแสของของไหลสามารถไหลเกิดการไหลหมุนควงที่รุนแรงกว่ากรณีอื่นๆ ซึ่งการหมุนควงไปกระทบกับผนังท่อเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศเย็นบริเวณกลางท่อกับอากาศร้อนบริเวณผนังท่อได้มากกว่ากรณีอื่น จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อ PR สูงขึ้นค่าการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าลดลง



รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า $P_r=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ $Re=3000 - 20000$

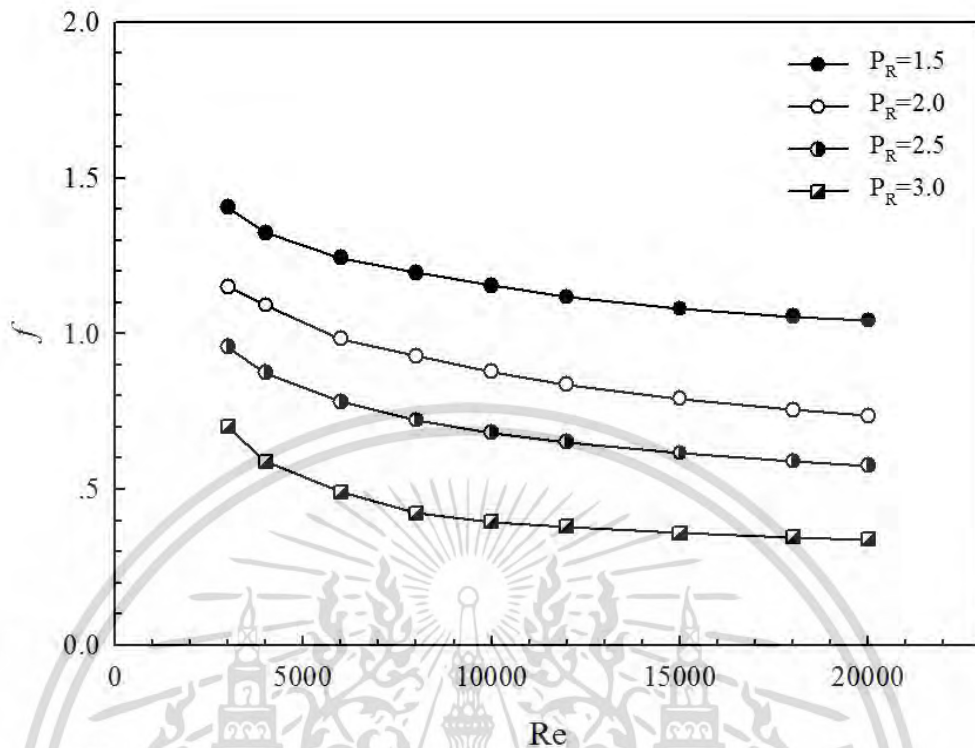
จากรูปที่ 5.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มีค่าลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มมากขึ้น และพบว่าที่ค่า $Pr=1.5$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับ $Pr = 2.0, 2.5$ และ 3.0 โดยสังเกตจากค่าเลขนัสเซิลท์ที่ลดลงเมื่อ Pr เพิ่มขึ้น



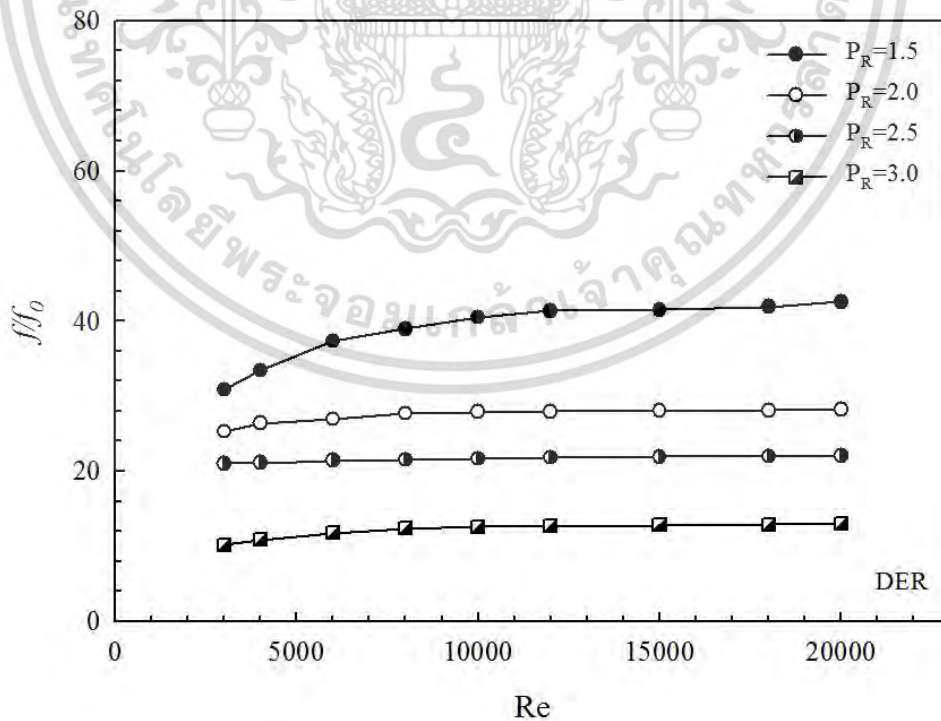
รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า $P_R=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ $Re=3000 - 20,000$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (ff_0) กับเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของแหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า $P_R=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ $Re=3000 - 20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.36 - 5.37

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง $0.33- 1.40$ ที่ค่า $Re=3000 - 20,000$ ของปีกสี่เหลี่ยมคี่และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง $10.13-47.56$ เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ พิจารณาที่ค่า $Re=3000 - 20,000$ จะเห็นได้ว่าแหวนทรงกรวยที่ PR สูงขึ้นยังให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ค่อนข้างน้อยจึงมีการพัฒนาปรับปรุงรูปร่างเพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทาน เพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนให้สูงสุด ด้วยรูปร่างที่เหมาะสมดังนั้นก็มีการปรับปรุงรูปร่างจากรูปแบบกรวยวงรีไปเป็นรูปทรงกลมกับรูปทรงเพชร โดยมุ่งหวังที่จะลดค่าตัวประกอบเสียดทาน

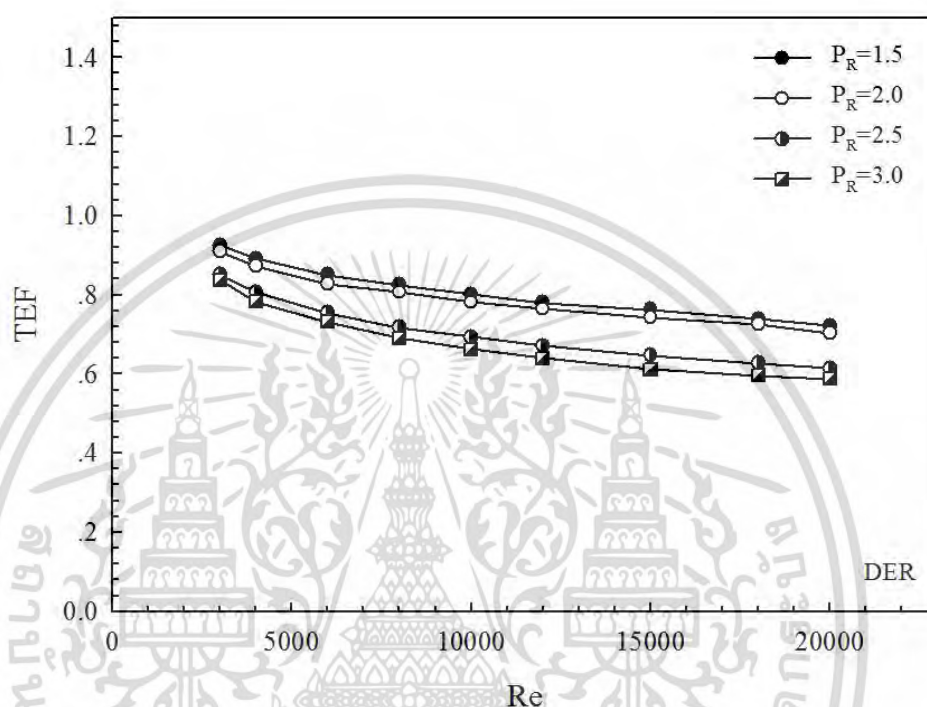


รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า $P_R=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $ar=0.6$ ที่ $Re=3000 - 20,000$



รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า $P_R=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $ar=0.6$ ที่ $Re=3000 - 20,000$
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของปีกแหวนทรงกรวยภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่ค่าเปลี่ยนค่า $P_R=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ $Re=3000 - 20,000$ ดังแสดงในรูปที่ 5.38

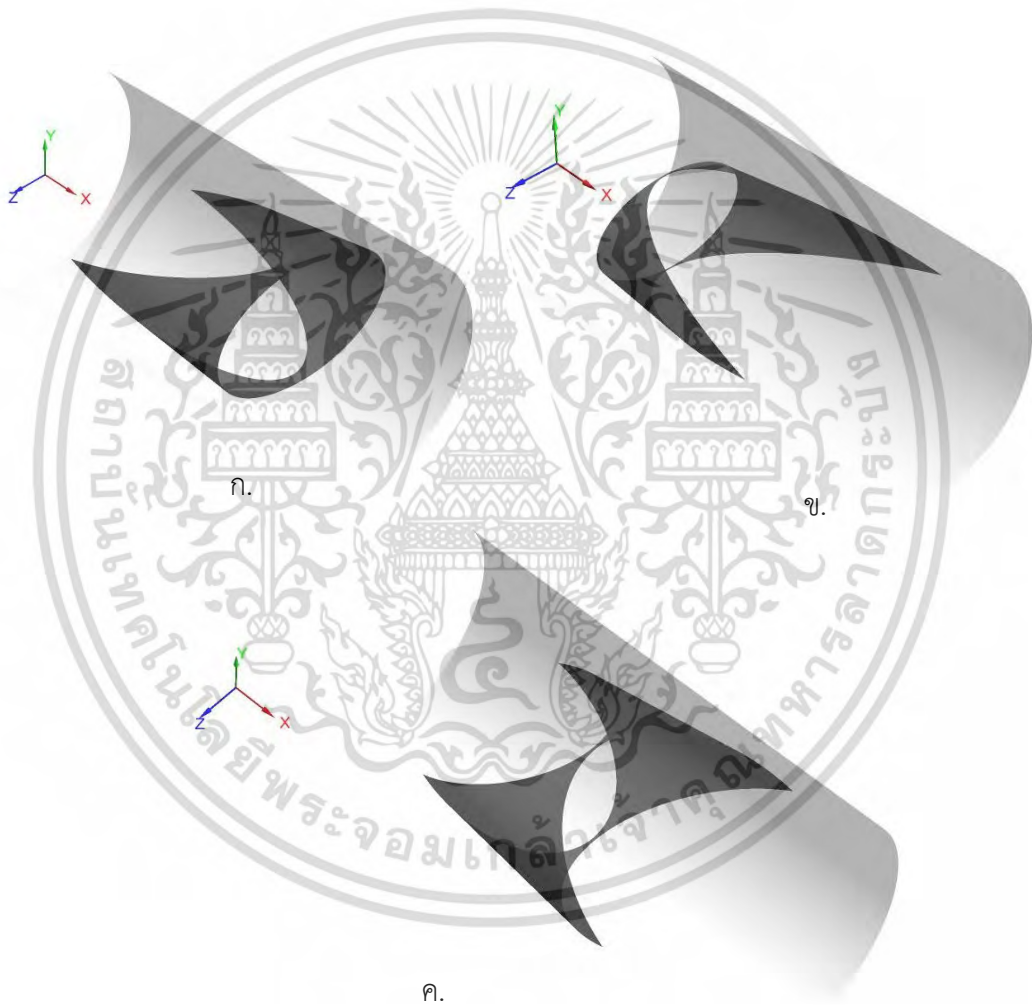


รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยและเปลี่ยนค่า $P_R=1.5, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ $Re=3000 - 20,000$

จากรูปที่ 5.30 แสดงค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อน (Nu/Nu_0) กับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) ที่เกิดขึ้นที่กำลังขับเคลื่อนเดียวกัน ในท่อที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยที่ระยะพิตช์ต่างกัน จากการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลข สังเกตเห็นว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นสำหรับทุกระยะพิตช์เนื่องจากความเร็วจากการไหลยังไม่พอต่อการผสมกันระหว่างอากาศร้อนที่บริเวณผนังท่อกับอากาศเย็นที่บริเวณตรงกลางท่อ โดยผ่านท่อที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยกรณีที่ $a_r=0.6$ ที่ $PR=1.5$ ให้ค่า TEF ดีที่สุดเท่ากับ 1.03 ที่ $Re=3000$

5.2.5 อิทธิพลของรูปแบบกรวยและมุมปะทะการไหล

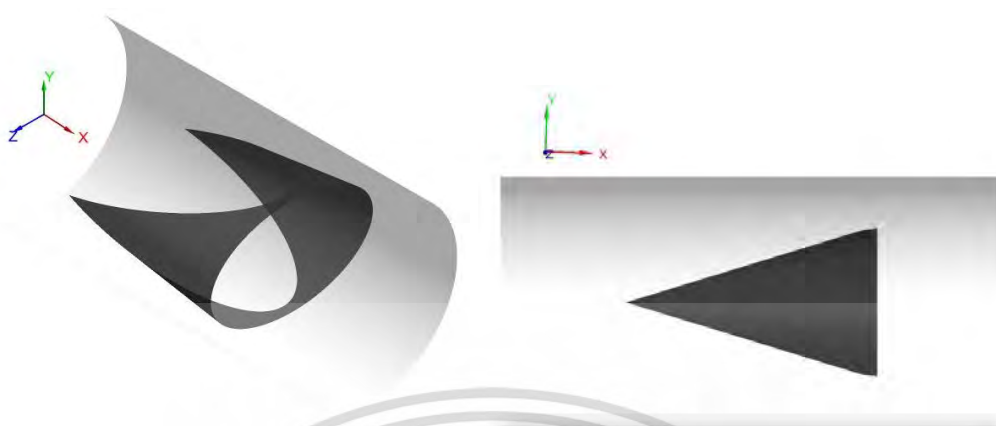
ส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาการปรับปรุงรูปร่างของแหวนทรงกรวยวงรี เพื่อให้ได้รูปร่างที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด โดยศึกษารวมไปถึงอิทธิพลมุมปะทะของแบบจำลองของท่อที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงที่ทั้งหมดสามรูปแบบ รูปแบบที่ 1 รูปทรงลิ้ม รูปแบบที่ 2 ลิ้มกลับทิศ รูปแบบที่ 3 รูปเพชร โดยพิจารณาที่ $a_r=0.6$ ที่ค่า $PR=1.5$ และ 2.0 กำหนดให้มุมปะทะการไหลของการปรับปรุงแบบที่ 1 $\alpha = 16.5^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ และ 30° กำหนดให้มุมปะทะการไหลของการปรับปรุงแบบที่ 2 $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25° กำหนดให้ระยะการตัดของรูปแบบการปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ระยะ $0.25D, 0.5D$ และ $0.75D$ ซึ่งพัฒนามาจากแหวนทรงกรวยวงรี กำหนดค่าไว้ที่ความยาวกรวยเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.39 ลักษณะของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง ก.รูปทรงลิ้ม ข.รูปทรงลิ้มกลับทิศ
ค.รูปทรงเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5.1 รูปแบบแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 1 (ทรงรูปปลี)



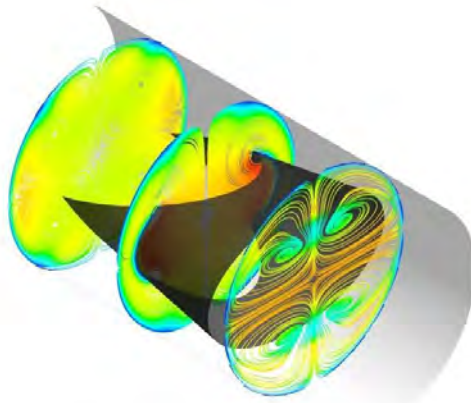
รูปที่ 5.40 ลักษณะของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 (ทรงรูปปลี)

รูปที่ 5.41 - 5.42 เส้นกระแสการไหลสองมิติ และสามมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 16.5^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ และ 30° ที่ค่า P_R พิจารณา $Re=3000$ พบว่าเมื่อของไหลผ่านแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง(ทรงรูปปลี) จะทำให้กระแสการไหลเกิดการหมุนควงของกระแส ส่งผลให้เกิดการผสมกันได้ดีขึ้นระหว่างของไหลเย็นบริเวณกลางท่อ และของไหลร้อนบริเวณผนังท่อ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดียิ่งขึ้นจึงเป็นผลต่อเนื่องให้การถ่ายเทความร้อนลดลงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม การติดตั้งแบบปรับปรุงยังส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงตามไปด้วยจึงเป็นผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าสูงขึ้น

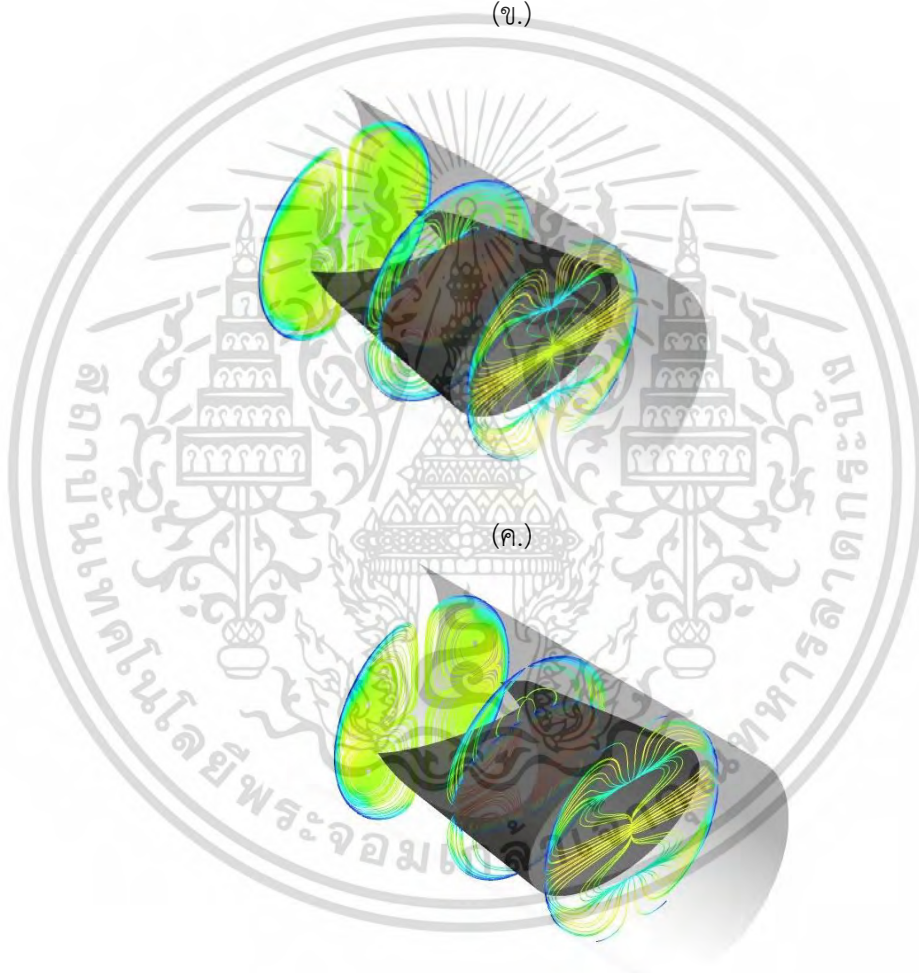


(ก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข.)

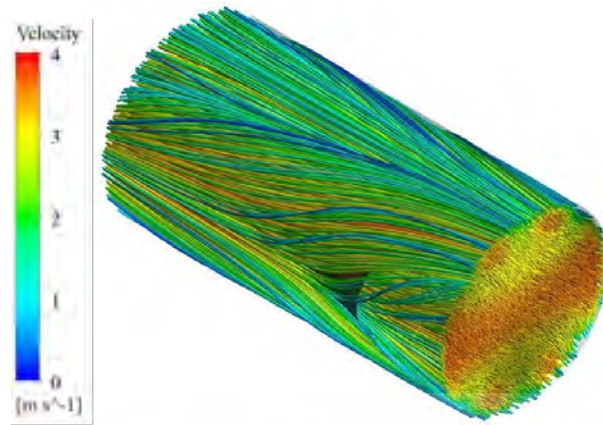


(ค.)

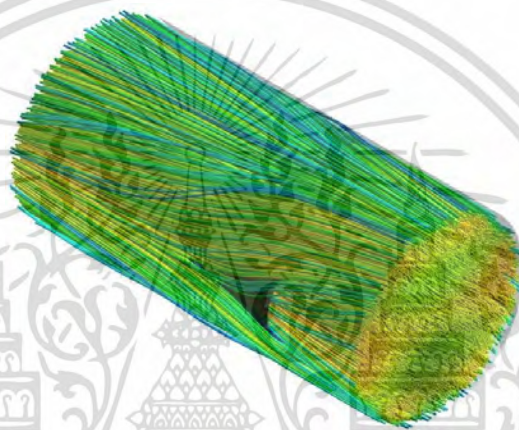
(ง.)

รูปที่ 5.41 เส้นกระแสการไหลสองมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 ที่มีมุมปะทะการไหล $\alpha = 16.5^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ และ 30° ตามลำดับ

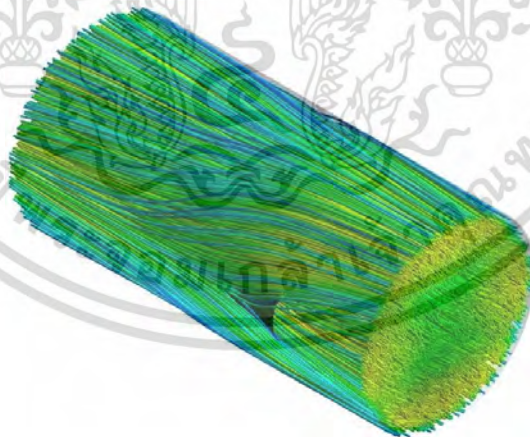
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.)

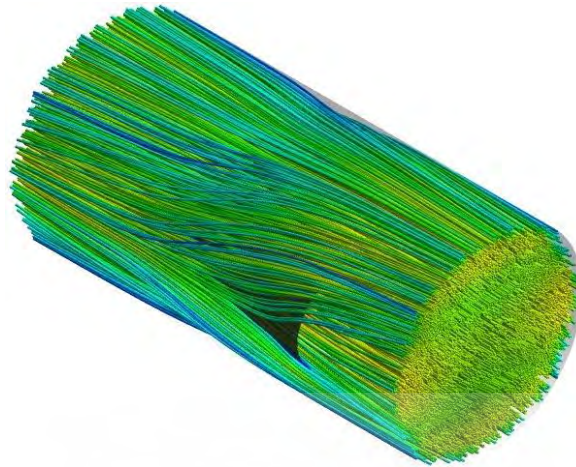


(ข.)



(ค.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

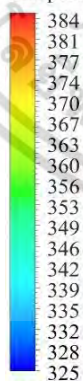


(ง.)

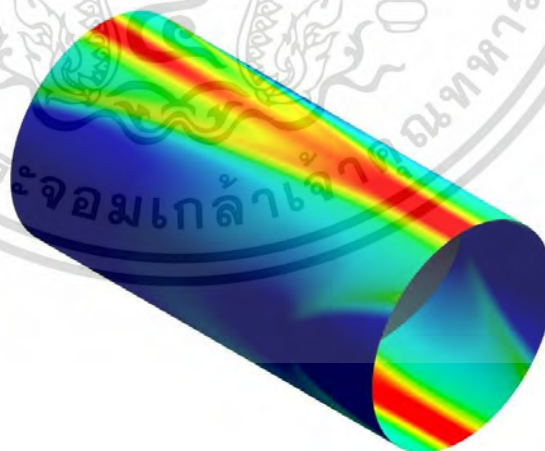
รูปที่ 5.42 เส้นกระแสการไหลสามมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 ที่มีมุมปะทะการไหล $\alpha = 16.5^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ และ 30° ตามลำดับ

รูปที่ 5.43 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิบริเวณผนังของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 ที่มีมุมปะทะการไหล $\alpha = 16.5^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ และ 30° PR = 1.5 ที่ค่า $a_r = 0.6$ พิจารณา $Re = 3000$ สำหรับท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิบริเวณผนังท่อสำหรับท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 จะเห็นได้ว่าบริเวณผนังท่อด้านบนของอากาศยังมีอุณหภูมิสูงซึ่งสังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดงบริเวณด้านบนของผนังท่อ ซึ่งเป็นผลมาจากการปั่นป่วนบริเวณนั้นที่มีความรุนแรงน้อยเมื่อเทียบบริเวณผนังท่อด้านข้างพบว่าเกิดการผสมผสานกันของอากาศเย็นบริเวณกลางท่อและอากาศร้อนบริเวณผนังท่อได้ดีจึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีบริเวณผิวท่อด้านข้างส่งผลให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงส่งผลให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงขึ้น

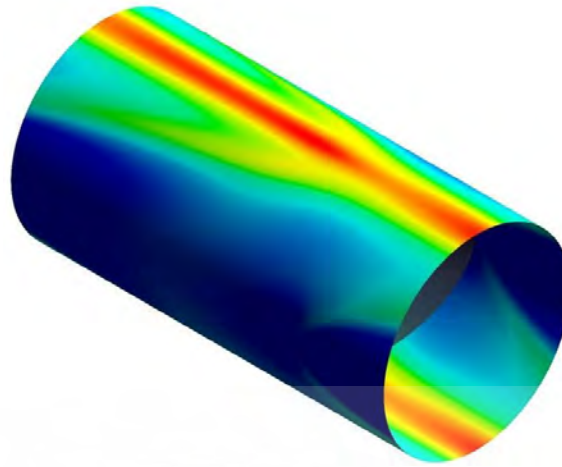
Temperature



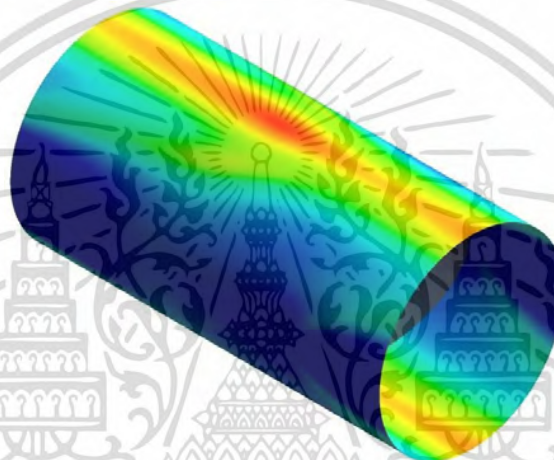
[K]



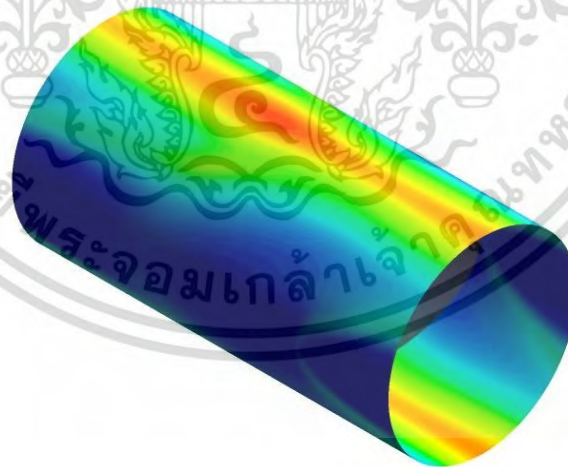
(ก.)



(ข.)



(ค.)

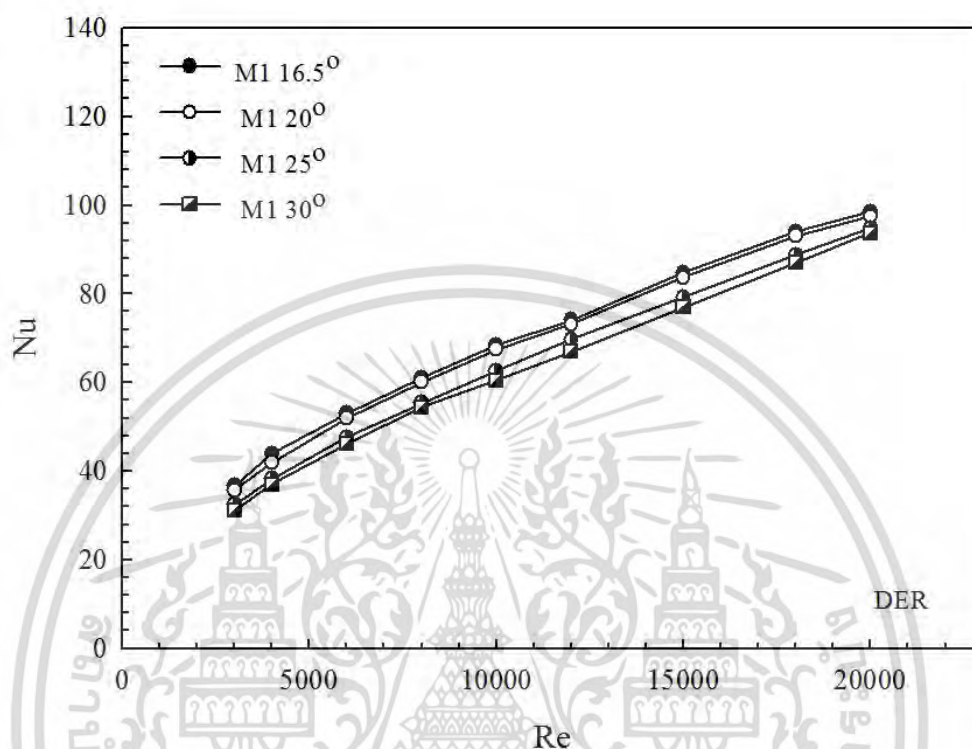


(ง.)

รูปที่ 5.43 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 16.5^\circ, 20, 25^\circ$ และ 30° ตามลำดับ

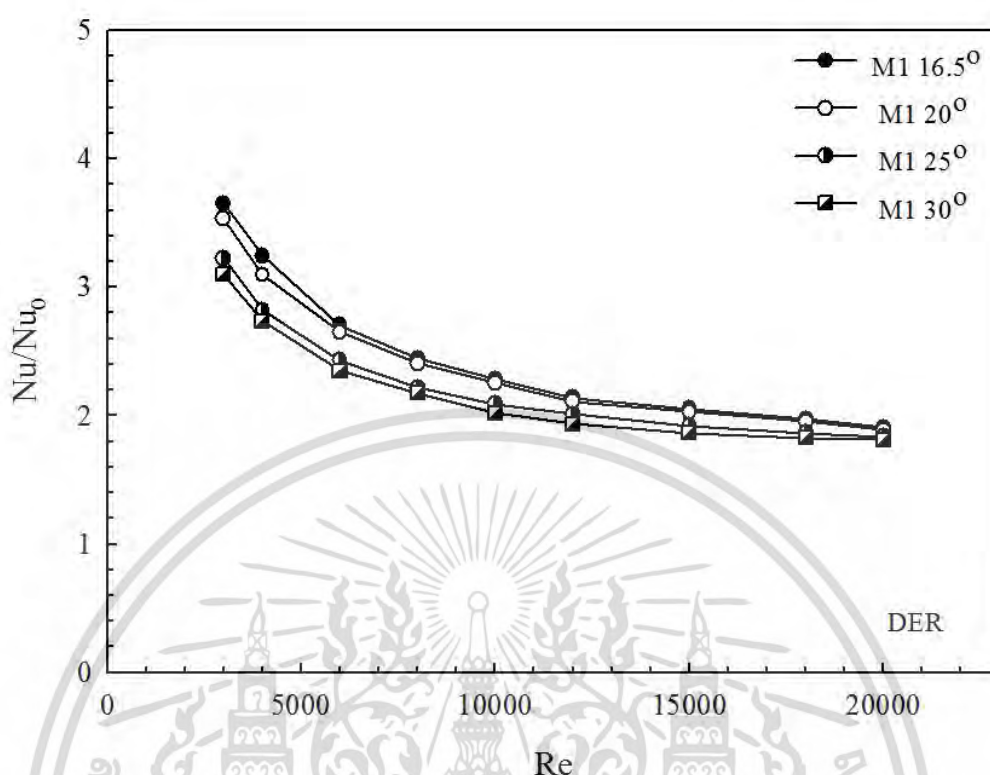
จากรูปที่ 5.44 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงรูปทรงลิ้มที่ปรับมุมปะทะการไหล $\alpha = 16.5^\circ, 20, 25^\circ$ และ 30° พบว่าแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงรูปทรงลิ้มที่ $\alpha = 16.5^\circ$ ส่งผลให้กระแสการไหลมีการหมุนควงที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รุนแรงที่สุด ส่งผลให้กระแสของของไหลสามารถไหลไปกระทบกับผนังของท่อเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากกว่ากรณีอื่น จากกราฟพบว่าแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงรูปทรงลิ่มให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีอื่น



รูปที่ 5.44 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 (รูปทรงลิ่ม)

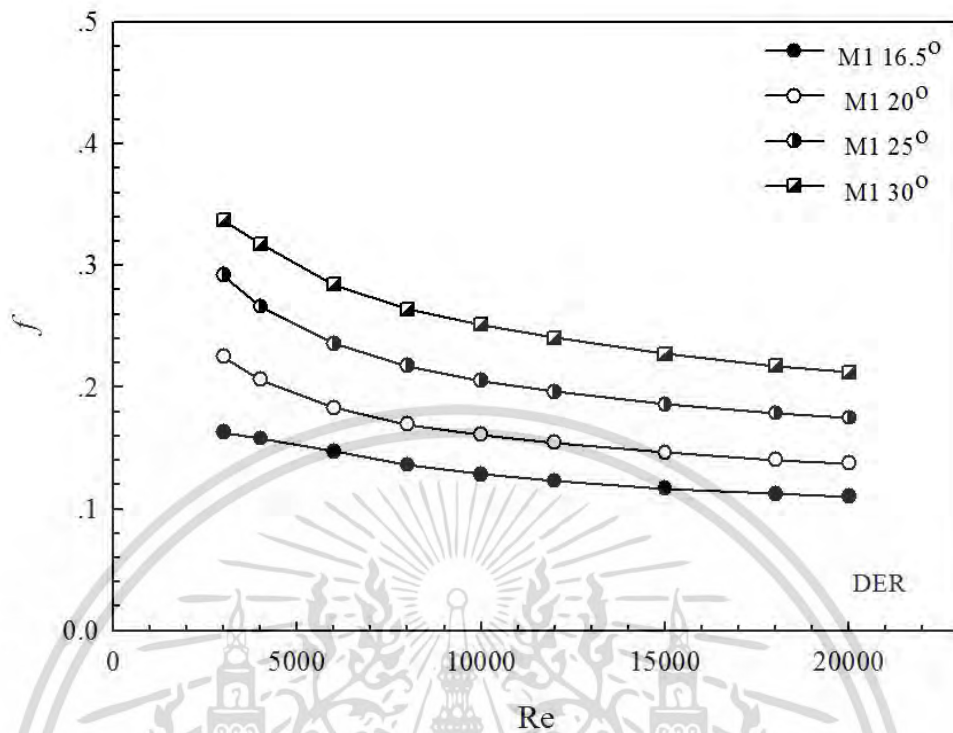
จากรูปที่ 5.45 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ส พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มีค่าลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น และพบว่าที่ค่า แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงรูปทรงลิ่มให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมและแหวนทรงกรวยที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงที่ $\alpha = 16.5^\circ$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์สูงกว่ากรณีอื่น



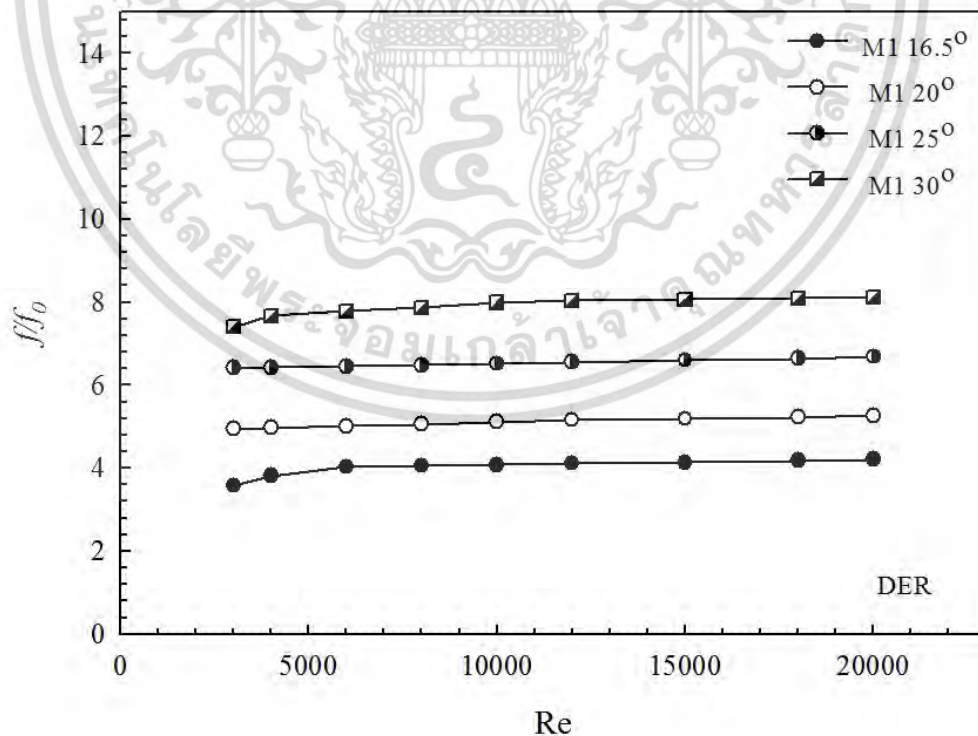
รูปที่ 5.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 (รูปทรงลิ้ม)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของช่องแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 (รูปทรงลิ้ม $\alpha=16.5^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ และ 30°) พิจารณาที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ค่า $PR=1.5$ ซึ่งพิจารณาในช่วง $Re=3000 - 20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.55 - 5.56

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง $0.110 - 0.337$ พิจารณาที่ค่า $Re=3000 - 20,000$ ของแหวนทรงกรวยและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง $3.58 - 8.11$ เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่มุมปะทะการไหล $\alpha=16.5^\circ$ ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่สูงกว่ามุมปะทะการไหลอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้ก็สูงเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha=16.5^\circ$ สูงกว่ากรณีของมุมปะทะการไหล $\alpha=20^\circ, 25^\circ$ และ 30°



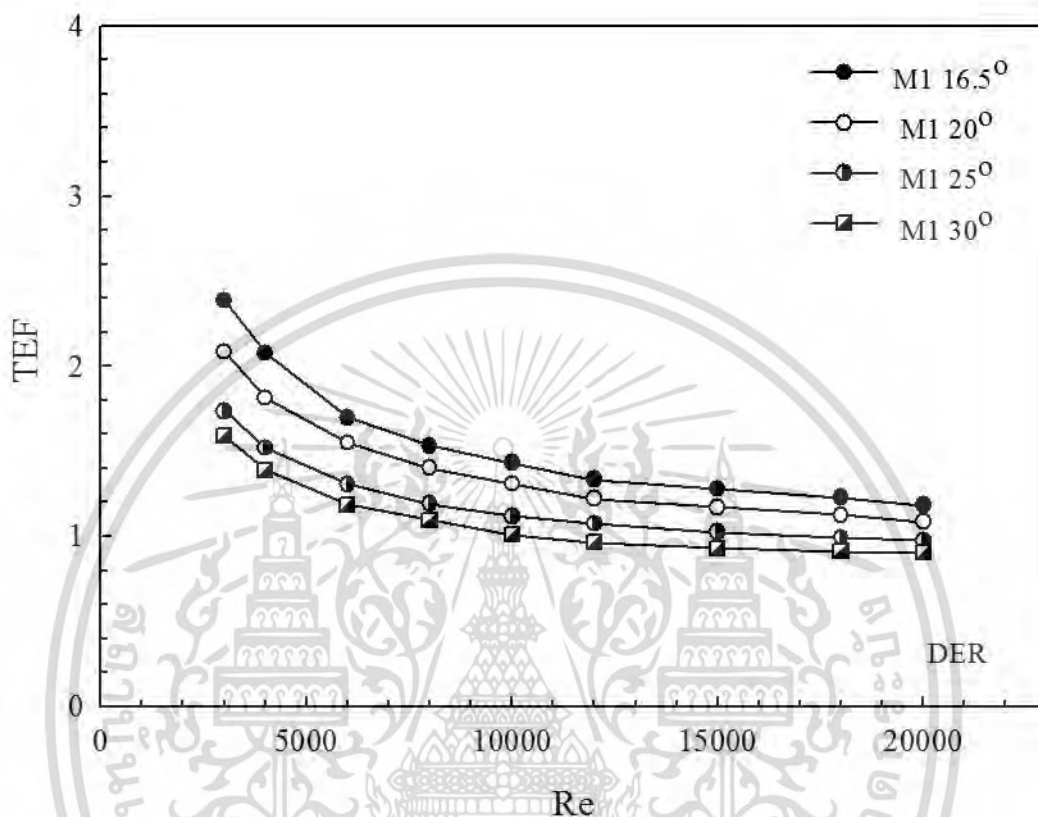
รูปที่ 5.46 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 (รูปทรงลิ้ม)



รูปที่ 5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 (รูปทรงลิ้ม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

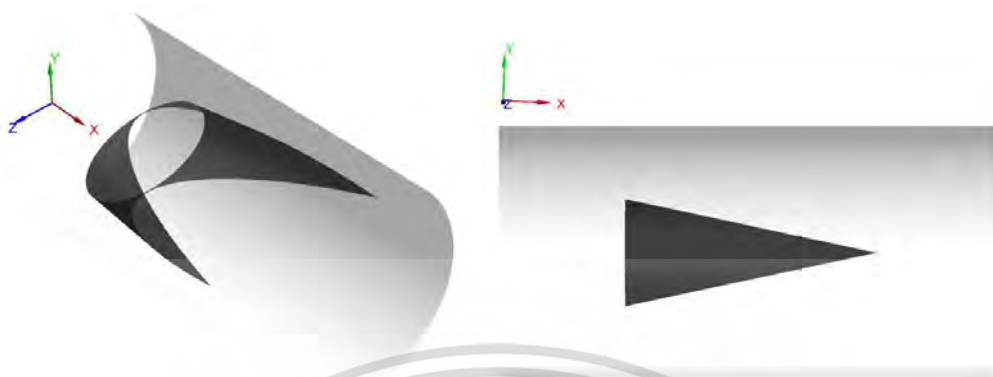
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง รูปทรงกลม ซึ่งพิจารณาที่ค่า $\alpha_r=0.6$ ที่ค่า $PR=1.5$ ซึ่งพิจารณาในช่วง $Re=3000 - 20,000$ ดังแสดงในรูปที่ 5.48



รูปที่ 5.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 (รูปทรงกลม)

จากรูปที่ 5.48 แสดงค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อน (Nu/Nu_0) กับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) ที่เกิดขึ้นที่กำลังขับเคลื่อนเดียวกัน ในท่อที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยที่ระยะพิตช์และมุมปะทะต่างกัน จากการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลข สังเกตเห็นว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้น สำหรับทุกระยะพิตช์และมุมปะทะต่างๆ เนื่องจากความเร็วจากการไหลยังไม่พอต่อการผสมกันระหว่างอากาศร้อนที่บริเวณผนังท่อกับตรงกลางท่อ โดยผ่านท่อที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยกรณีที่มี $\alpha=16.5^\circ$ $PR=1.5$ ให้ค่า TEF ดีที่สุดเท่ากับ 2.39 ที่ $Re=3000$

5.2.5.2 รูปแบบแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 2 (ทรงรูปสี่เหลี่ยมกลับทิศ)



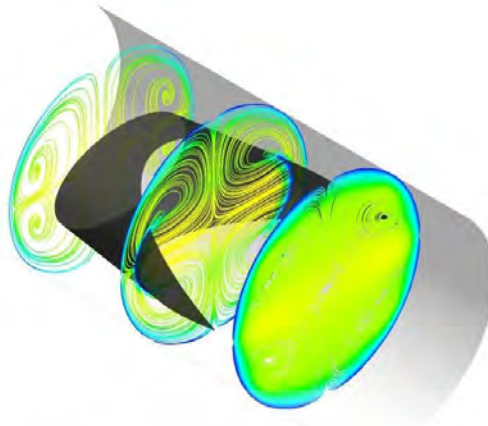
รูปที่ 5.49 ลักษณะของทอกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 (รูปทรงสี่เหลี่ยมกลับทิศ)

รูปที่ 5.50 - 5.51 เส้นกระแสการไหลสองมิติ และสามมิติของทอกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 16.5^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ และ 30° ที่ค่า P_r พิจารณา $Re=3000$ พบว่าเมื่อของไหลผ่านแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง(ทรงรูปสี่เหลี่ยม) จะทำให้กระแสการไหลเกิดการหมุนวนของกระแส ส่งผลให้เกิดการผสมกันได้ดีขึ้นระหว่างของไหลเย็นบริเวณกลางท่อ และของไหลร้อนบริเวณผนังท่อ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดียิ่งขึ้นจึงเป็นผลต่อเนื่องให้การถ่ายเทความร้อนลดลงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม การติดตั้งแบบปรับปรุงยังส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงตามไปด้วยจึงเป็นผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าสูงขึ้น

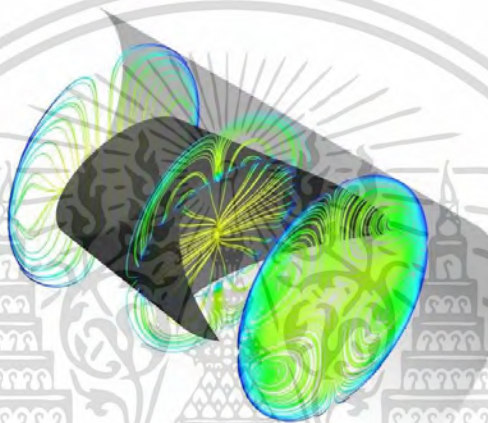


(ก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

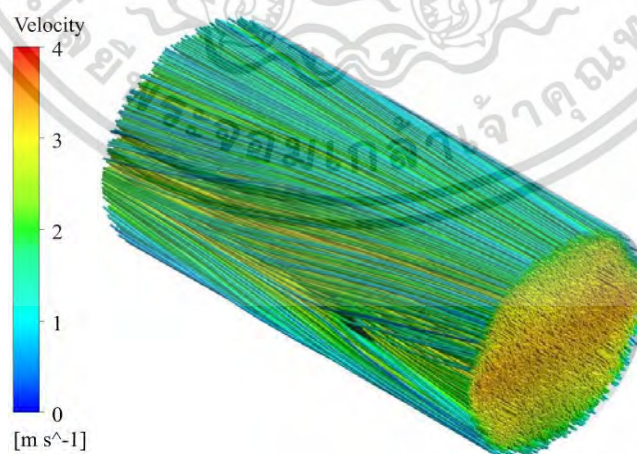


(ข.)



(ค.)

รูปที่ 5.50 เส้นกระแสการไหลสองมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25° ตามลำดับ

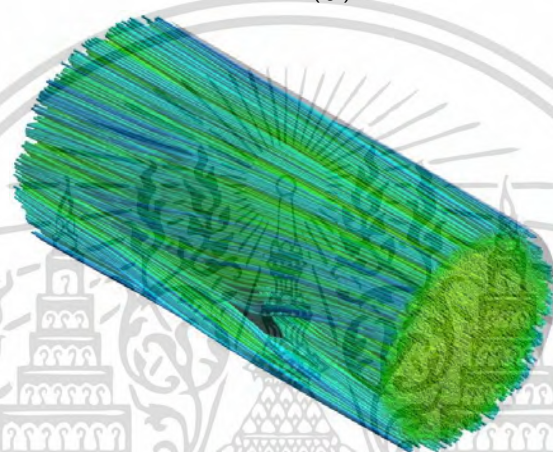


(ก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



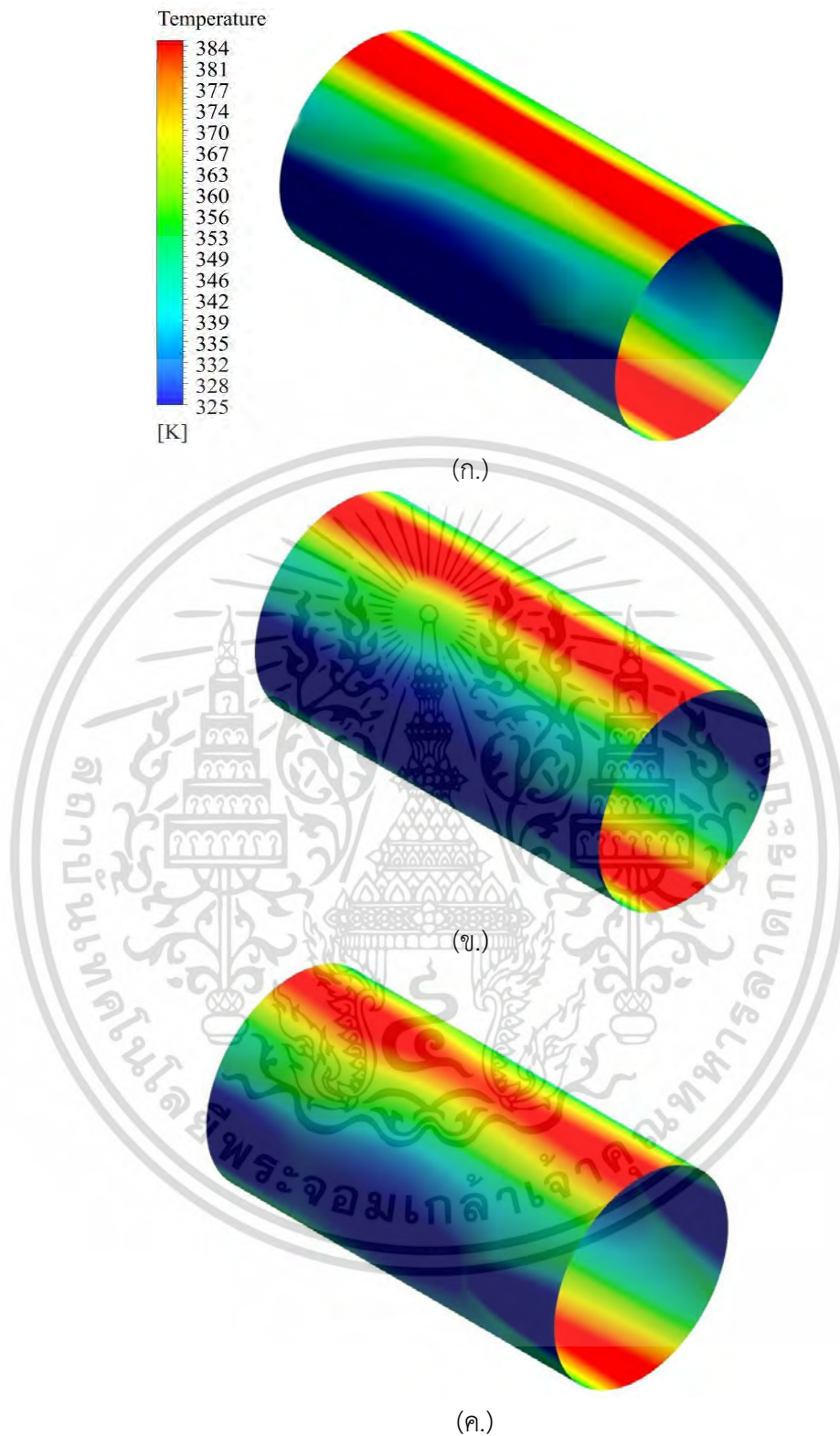
(ข.)



(ค.)

รูปที่ 5.51 เส้นกระแสการไหลสามมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 ที่มีมุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25° ตามลำดับ

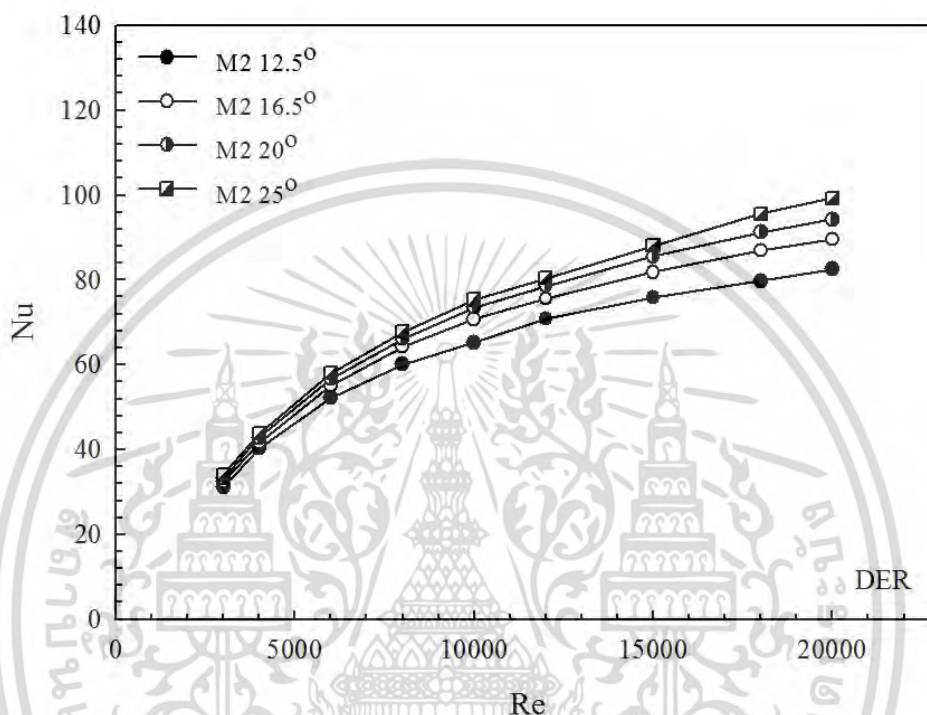
รูปที่ 5.52 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิบริเวณผนังท่อที่ $P_r = 1.5$ ที่ค่า $a_r = 0.6$ พิจารณา $Re = 3000$ สำหรับท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 รูปทรงลิ้ม เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิบริเวณผนังท่อสำหรับท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 1 จะเห็นได้ว่าบริเวณผนังท่อด้านบนอากาศยังมีอุณหภูมิสูงซึ่งสังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดงบริเวณด้านบนของผนังท่อ ซึ่งเป็นผลมาจากการปั่นป่วนบริเวณนั้นที่มีความรุนแรงน้อยเมื่อเทียบบริเวณผนังท่อด้านข้างพบว่าเกิดการผสมผสานกันของอากาศเย็นบริเวณกลางท่อและอากาศร้อนบริเวณผนังท่อได้ดีจึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีบริเวณผิวท่อด้านข้างส่งผลให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงส่งผลให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรวยแบบดั้งเดิมและกรวยวงรีที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง



รูปที่ 5.52 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25° ตามลำดับ

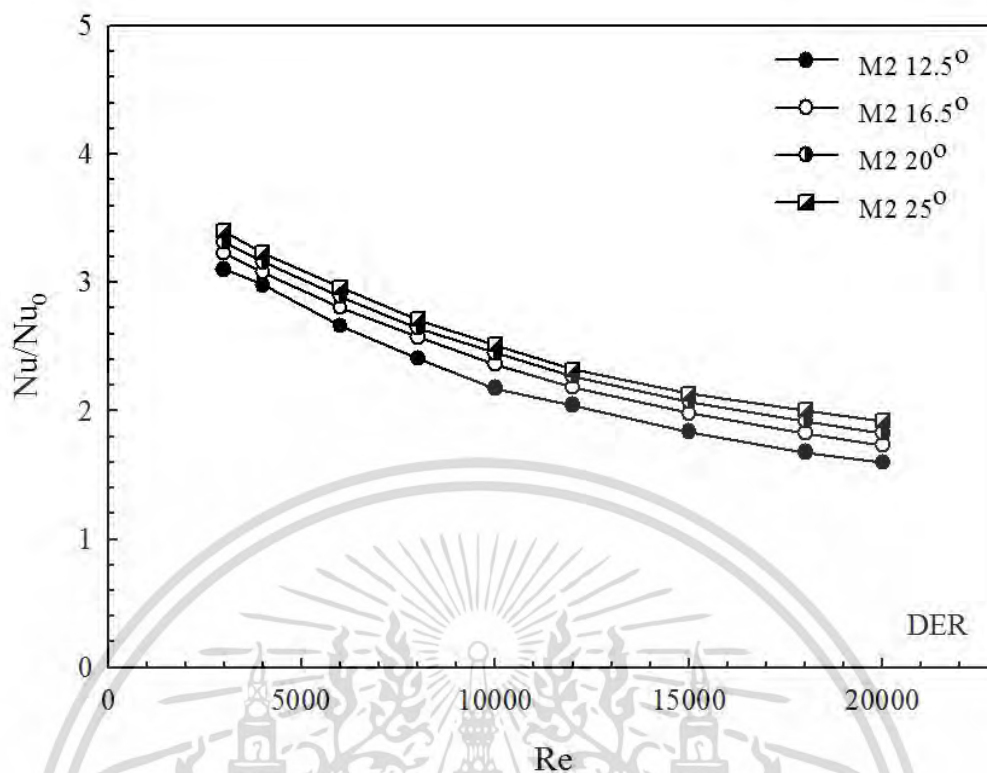
จากรูปที่ 5.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ส พบว่าค่าค่าเลขนัสเซลล์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น และ แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 ที่มุมปะทะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหล $\alpha = 25^\circ$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับมุมปะทะการไหลของรูปทรงลิ้มกลับ ทิศแต่ค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้ก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ส่งผลให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้ ยังมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ$ ซึ่งให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำกว่าแต่ในทางเดียวกันเมื่อค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำ ค่าตัวประกอบเสียดทานก็ต่ำไปด้วยดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้มีค่าสูงกว่ากรณีที่มีมุมปะทะการไหลที่สูงขึ้น



รูปที่ 5.53 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25°

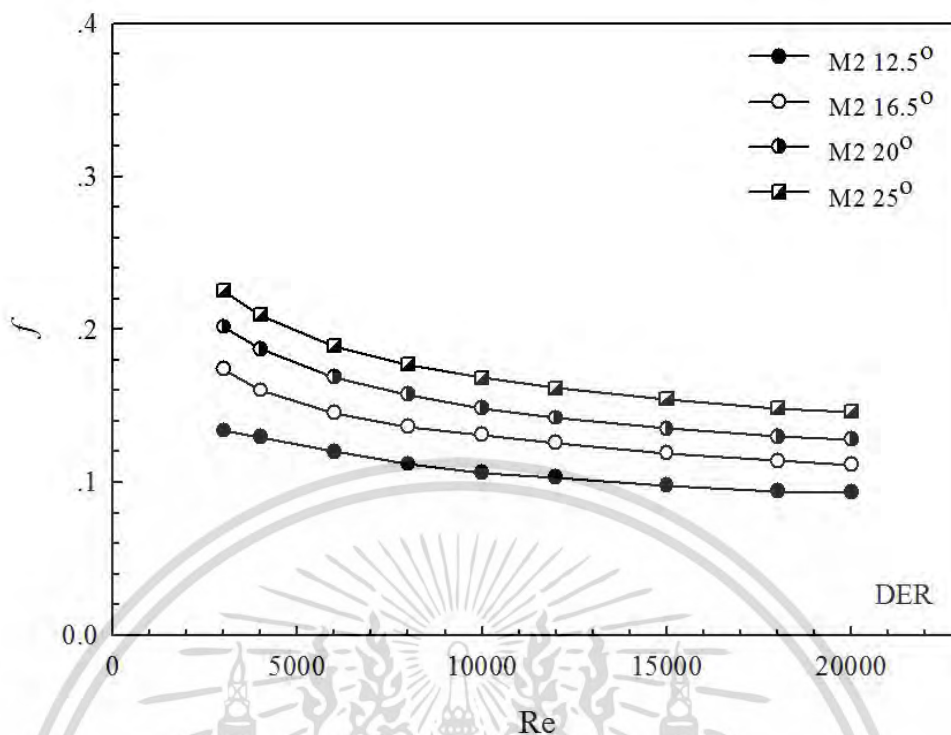
จากรูปที่ 5.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ส พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์มีค่าลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น และ แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 ที่มีมุมปะทะการไหล $\alpha = 25^\circ$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับมุมปะทะการไหลของรูปทรงลิ้มกลับทิศแต่ค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้ก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ส่งผลให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้ยังมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 ที่มีมุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ$ ซึ่งให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำกว่าแต่ในทางเดียวกันเมื่อค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำ ค่าตัวประกอบเสียดทานก็ต่ำไปด้วยดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ได้มีค่าสูงกว่ากรณีที่มีมุมปะทะการไหลที่สูงขึ้น



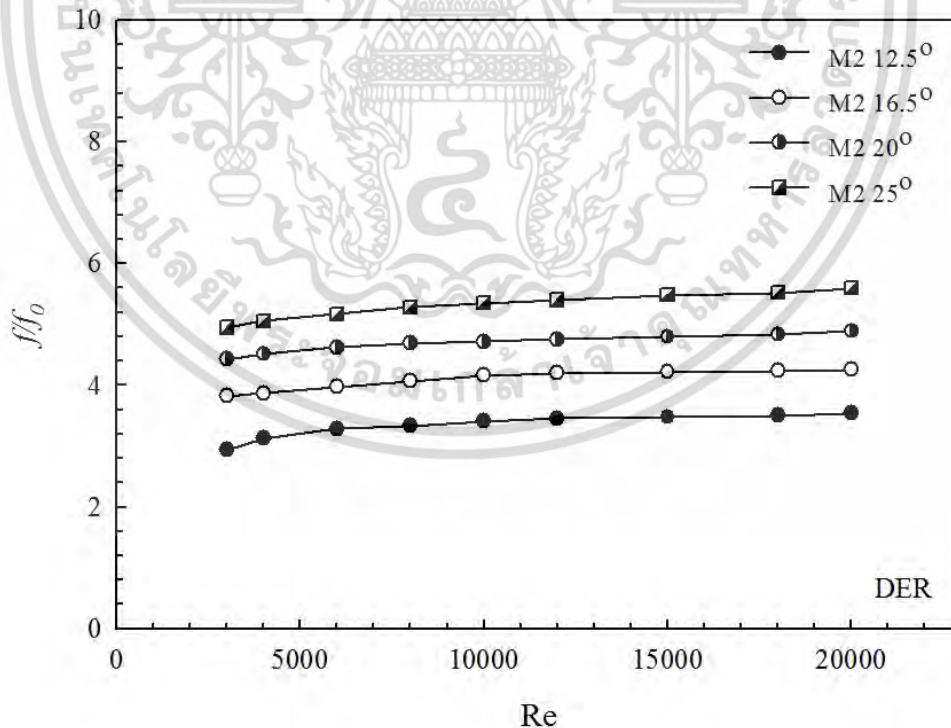
รูปที่ 5.54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 มุมปะทะการไหล $\alpha=12.5^\circ$, 16.5° , 20° และ 25°

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 (รูปทรงลิ้มกลับทิศ $\alpha=12.5^\circ$) พิจารณาที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ค่า $PR=1.5$ ซึ่งพิจารณาในช่วง $Re=3000 - 20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.55 - 5.56

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง $0.093 - 0.225$ พิจารณาที่ค่า $Re=3000 - 20,000$ ของแหวนทรงกรวยและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง $2.94 - 5.59$ เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ$ ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่สูงกว่ามุมปะทะการไหลอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้ก็สูงเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 ที่มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ$ สูงกว่ากรณีของมุมปะทะการไหล $\alpha = 16.5^\circ$, 20° และ 25°



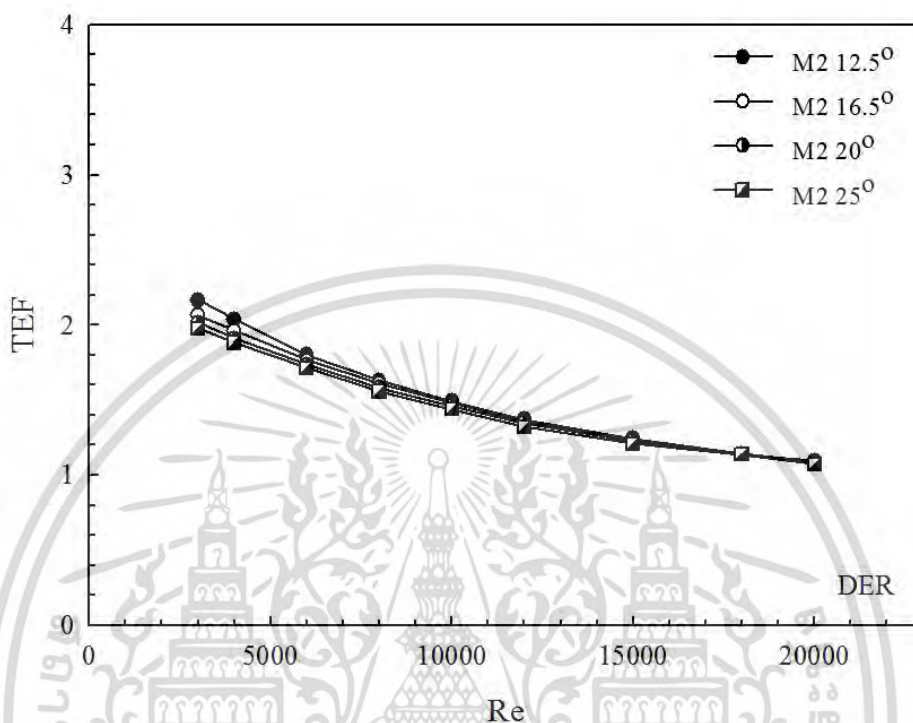
รูปที่ 5.55 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25°



รูปที่ 5.56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 มุมปะทะการไหล $\alpha = 12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

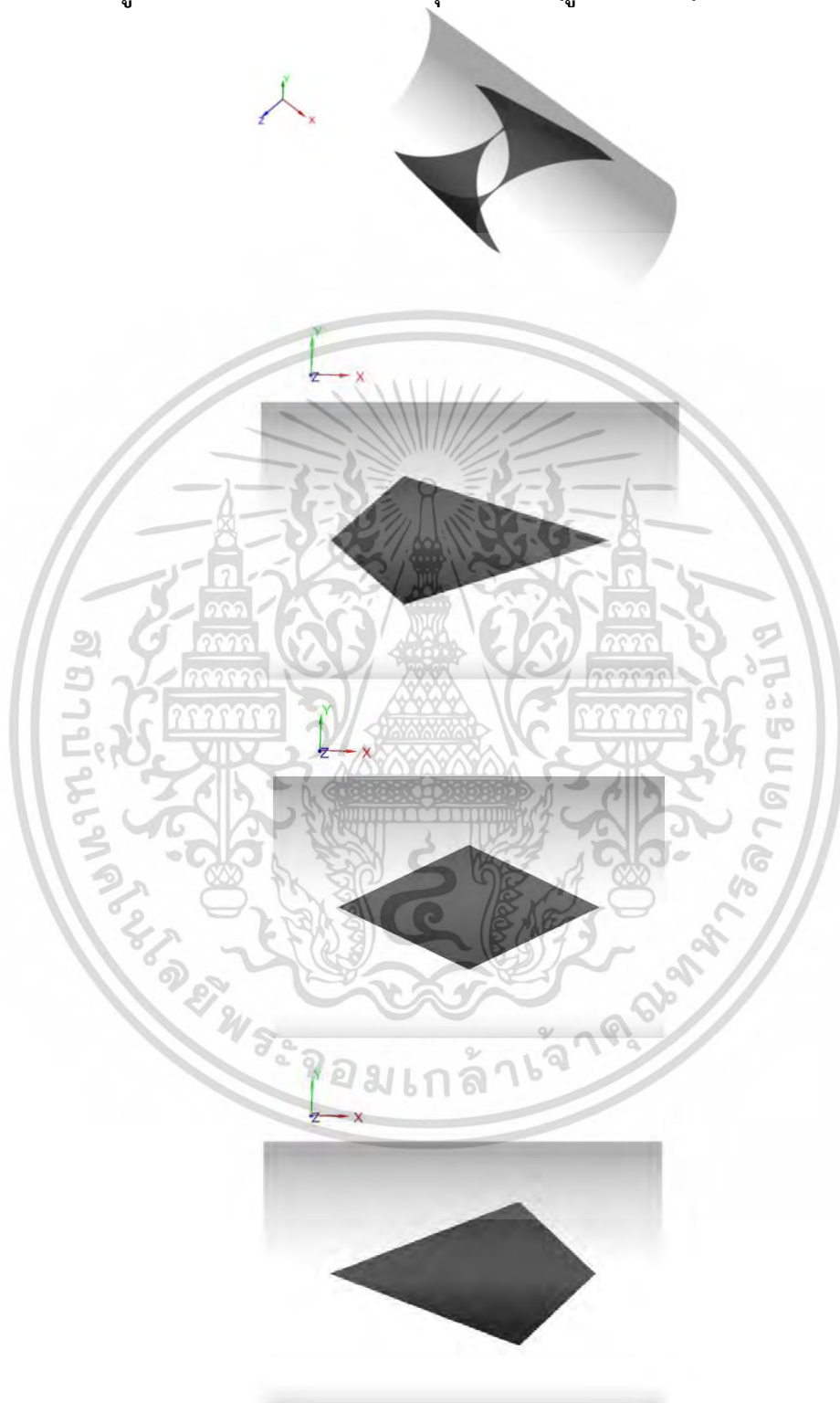
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 (รูปทรงลิ่มกลับทิศ) ซึ่งพิจารณาที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ค่า PR=1.5 ซึ่งพิจารณาในช่วง $Re=3000 - 20,000$ ดังแสดงในรูปที่ 5.57



รูปที่ 5.57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 มุมปะทะการไหล $\alpha=12.5^\circ, 16.5^\circ, 20^\circ$ และ 25°

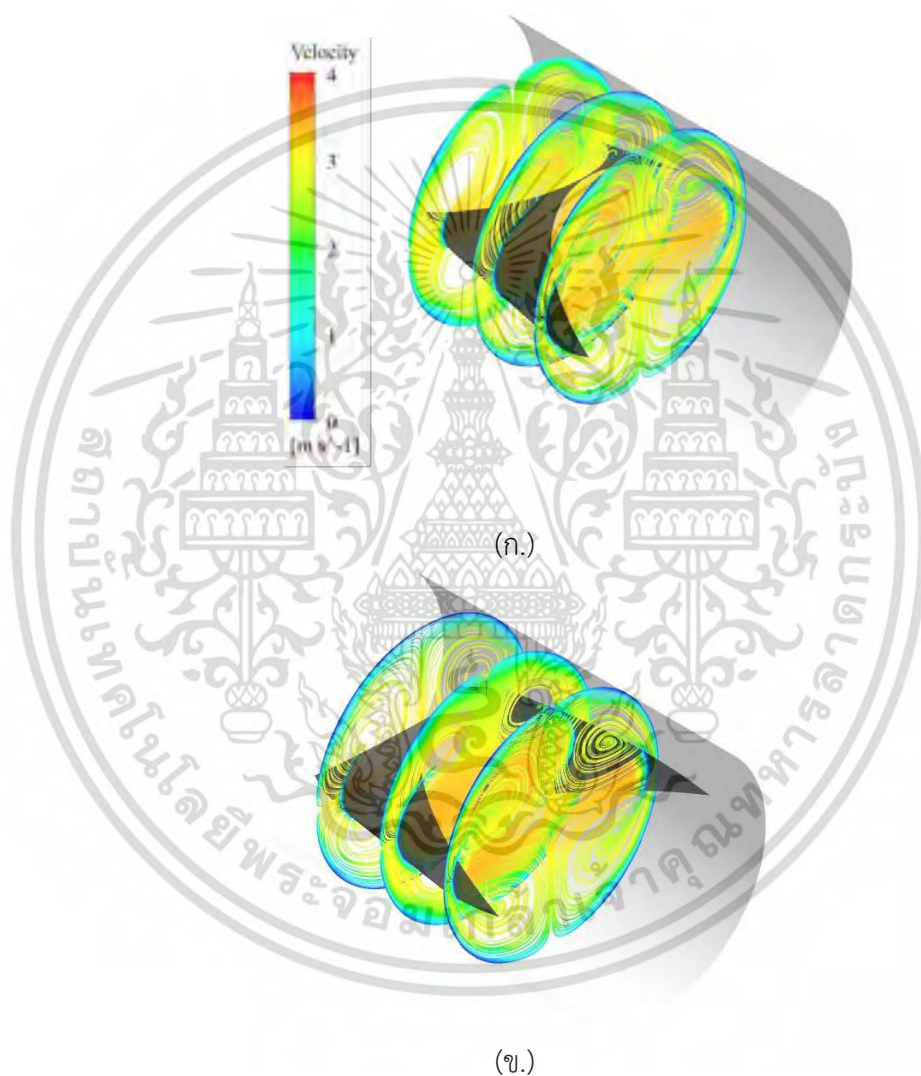
จากรูปที่ 5.57 แสดงค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อน (Nu/Nu_0) กับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) ที่เกิดขึ้นที่กำลังขับเคลื่อนเดียวกัน ในท่อที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยที่ระยะพิตซ์และมุมปะทะต่างกัน จากการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลข สังเกตเห็นว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นสำหรับทุกระยะพิตซ์และมุมปะทะต่างๆ เนื่องจากความเร็วจากการไหลยังไม่พอต่อการผสมกันระหว่างอากาศร้อนที่บริเวณผนังท่อกับตรงกลางท่อ โดยท่อกลมที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 2 กรณีที่ $\alpha=12.5^\circ$ PR=1.5 ให้ค่า TEF ดีที่สุดเท่ากับ 2.17 ที่ $Re=3000$

5.2.5.3 รูปแบบแหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร)

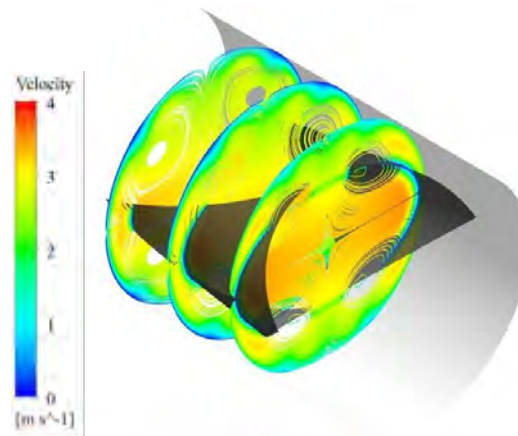


รูปที่ 5.58 ลักษณะของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณา
 ระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D ตามลำดับ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.59 เส้นกระแสการไหลสองมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D ตามลำดับ และเปลี่ยนที่ค่า PR =1.5 และ 2.0 ที่ค่า $ar=0.6$ ที่ค่า $Re=3000$ พบว่าเมื่อของไหลผ่านแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงที่ ระยะตัด 0.75D จะทำให้กระแสการไหลเกิดการหมุนควงของกระแส ส่งผลให้เกิดการผสมกันได้ดีขึ้น ระหว่างของไหลเป็นบริเวณกลางท่อ และอากาศร้อนบริเวณผนังท่อ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดียิ่งขึ้นจึงเป็นผลต่อเนื่องให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การติดตั้งแหวน ทรงกรวยแบบปรับปรุงยังส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงขึ้นตามไปด้วย



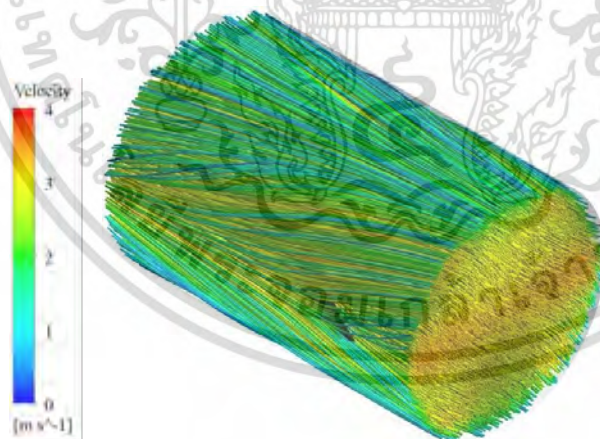
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค.)

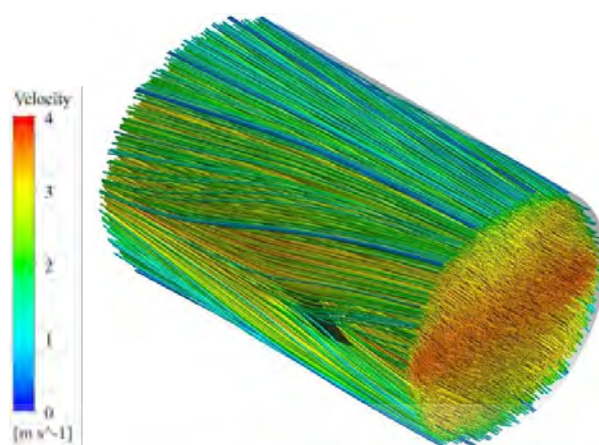
รูปที่ 5.59 เส้นกระแสการไหลสองมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D ตามลำดับ

รูปที่ 5.60 เส้นกระแสการไหลสามมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D ตามลำดับ และเปลี่ยนที่ค่า PR = 1.5 และ 2.0 ที่ค่า $a_r = 0.6$ ที่ค่า $Re = 3000$ พบว่าเมื่อของไหลผ่านแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงที่ระยะตัด 0.75D จะทำให้กระแสการไหลเกิดการหมุนควงของกระแส ส่งผลให้เกิดการผสมกันได้ดีขึ้นระหว่างของไหลเย็นบริเวณกลางท่อ และอากาศร้อนบริเวณผนังท่อ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดียิ่งขึ้นจึงเป็นผลต่อเนื่องให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงยังส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงขึ้นตามไปด้วย

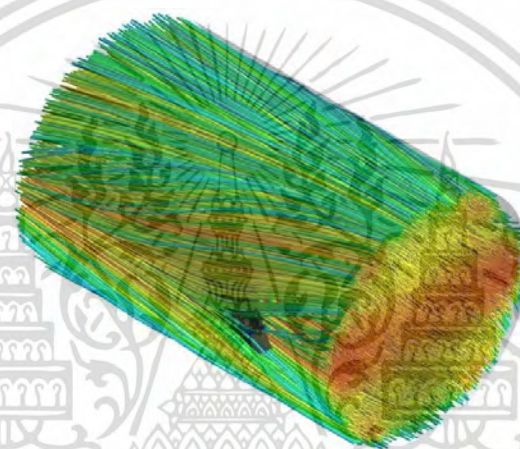


(ก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



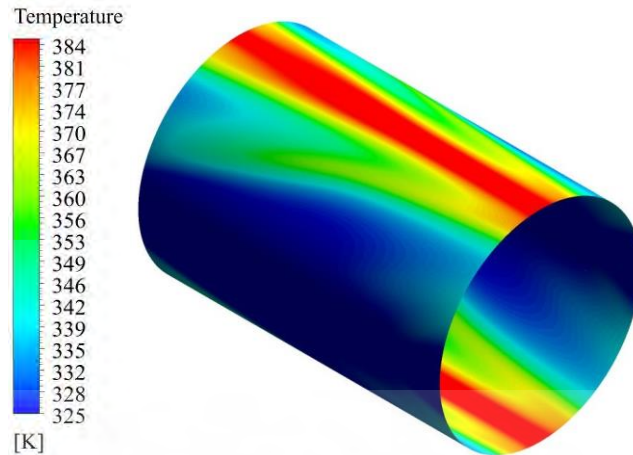
(ข.)



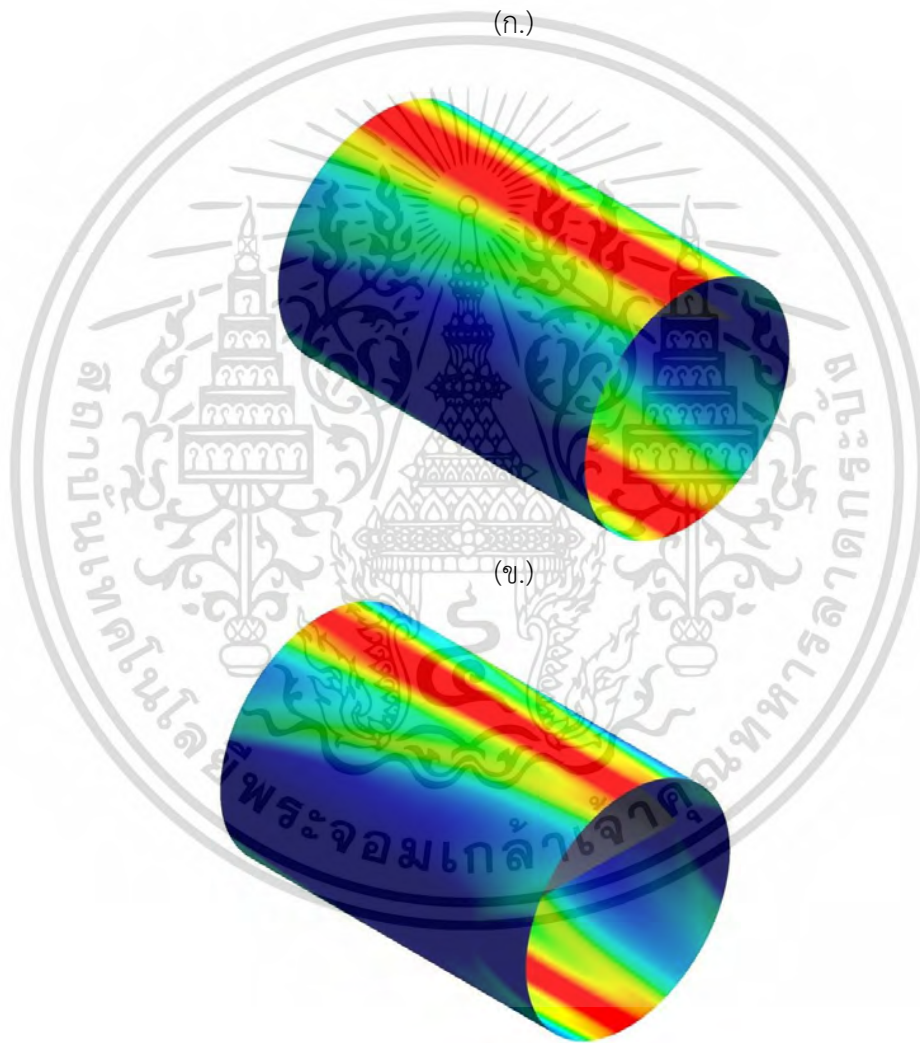
(ค.)

รูปที่ 5.60 เส้นกระแสการไหลสามมิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D ตามลำดับ

รูปที่ 5.61 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิบริเวณผนังท่อที่ $PR = 1.5$ ที่ค่า $a_r = 0.6$ พิจารณา $Re = 3000$ สำหรับท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิบริเวณผนังท่อสำหรับท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงรูปทรงเพชร จะเห็นได้ว่าบริเวณผนังท่อด้านบนอากาศยังมีอุณหภูมิสูงซึ่งสังเกตได้จากคอนทัวร์สีแดงบริเวณด้านบนของผนังท่อ ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลหมุนควงบริเวณนั้นที่ยังมีความรุนแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณผนังท่อด้านข้างพบว่าเกิดการผสมผสานกันระหว่างอากาศเย็นบริเวณกลางท่อและอากาศร้อนบริเวณผนังท่อได้ดี จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีบริเวณผิวท่อด้านข้างส่งผลให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงทำให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงขึ้น



(ก.)



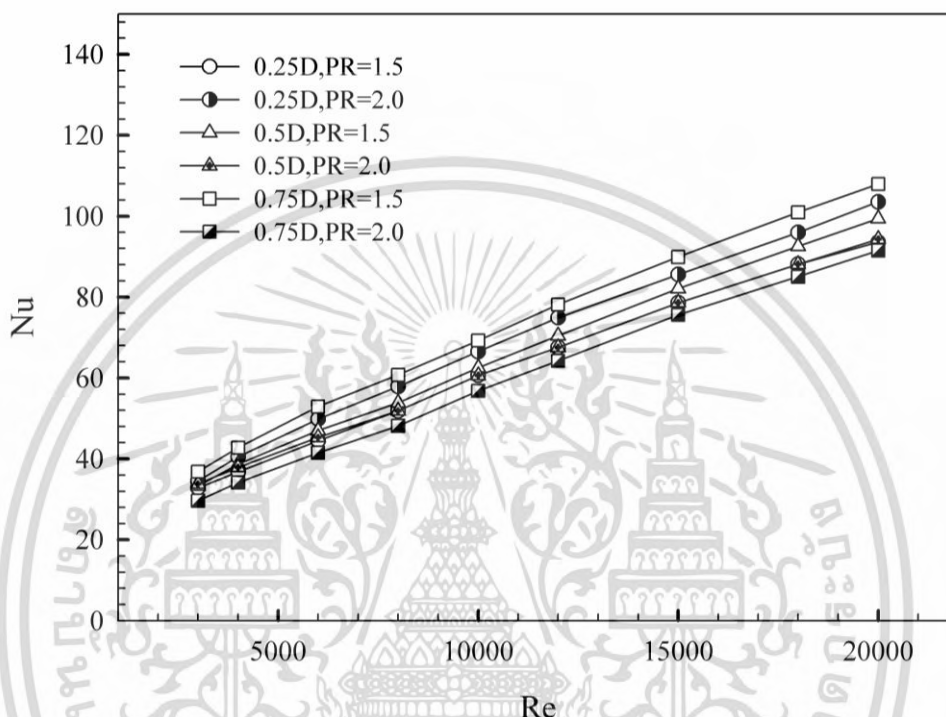
(ข.)

(ค.)

รูปที่ 5.61 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D ตามลำดับ

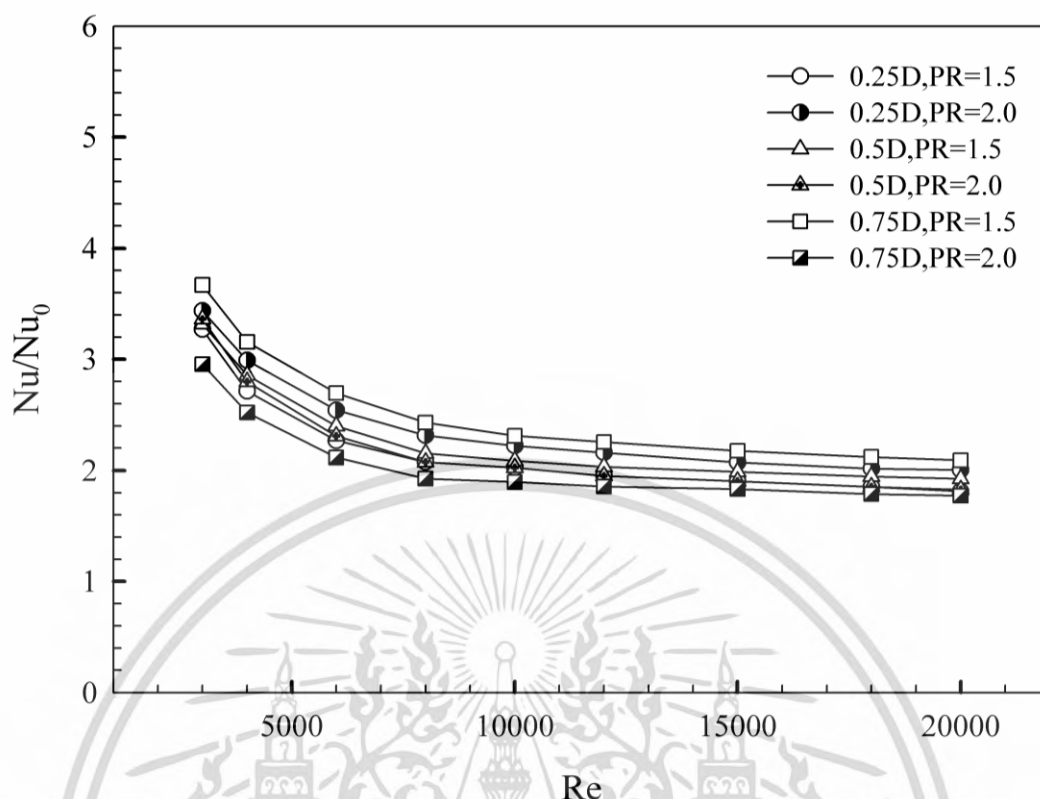
จากรูปที่ 5.62 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D พบว่าที่ระยะตัด 0.75D ส่งผลให้กระแสการไหลมีการหมุนควงที่รุนแรง ซึ่งส่งผลให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสของของไหลเกิดการไหลแบบหมุนควงทำให้อากาศเย็นบริเวณกลางท่อไปชนกับผนังท่อร้อน ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากกว่ากรณีที่ระยะตัด 0.25D และ 0.5D และส่งผลให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงดังแสดงในรูปที่ 5.62 แต่อย่างไรก็ตามค่าตัวประกอบเสียดทานก็เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน จากกราฟพบว่าแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ระยะตัด 0.75D ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีอื่น ค่าการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง 29.66- 107.94 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ส 3000-20000



รูปที่ 5.62 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สที่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D

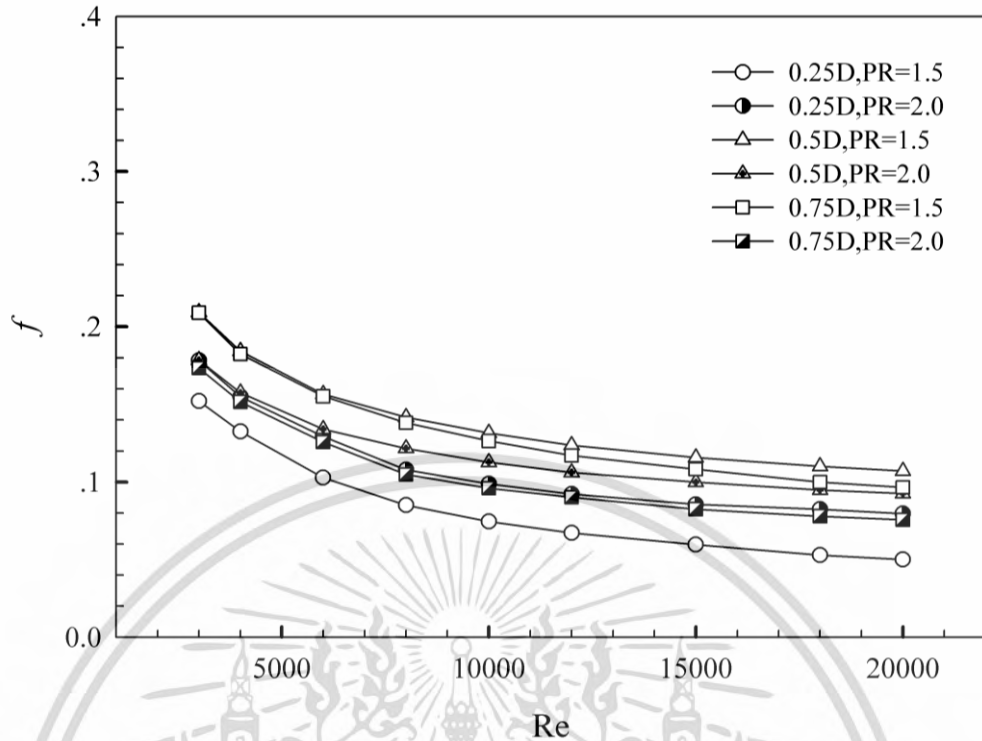
จากรูปที่ 5.63 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ส พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์มีค่าลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น จากกราฟจะเห็นได้ว่าแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ระยะตัด 0.75D ให้อัตราส่วนตัวเลขนัสเซลท์ที่มากกว่าระยะ 0.25D และ 0.5D ซึ่งส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงด้วยเช่นเดียวกันดังนั้นจึงส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าระยะตัด 0.25D และ 0.5D ส่งผลให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าทั้งสองกรณีดังแสดงในรูปต่อไปนี้



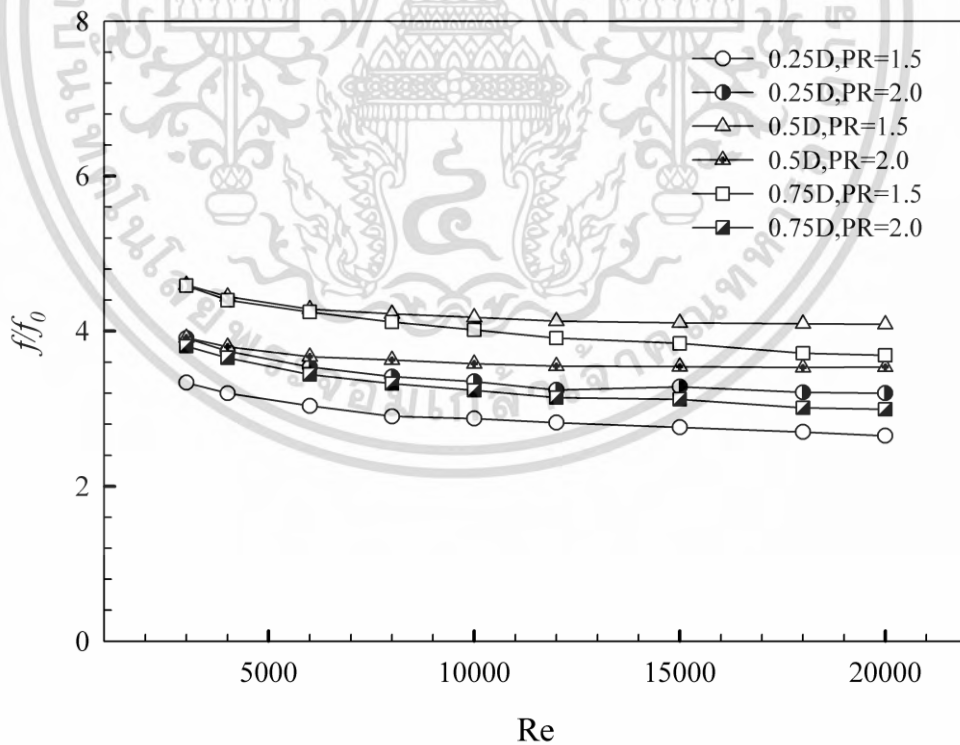
รูปที่ 5.63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) กับเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D พิจารณาที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ค่า $Pr=1.5$ และ 2.0 ในช่วง $Re=3000-20,000$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.64 - 5.65

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง $0.0756 - 0.209$ ที่พิจารณาค่า $Re=3000 - 20,000$ ของแหวนทรงกรวยและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ในช่วง $2.65-4.57$ เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ จากกราฟจะเห็นได้ว่าแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 ที่ระยะตัด 0.25D ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่น้อยกว่าระยะ 0.5D และ 0.75D ส่วนที่ระยะตัด 0.75D ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มากกว่า ระยะ 0.25D และ 0.75D ซึ่งส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้สมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าระยะตัด 0.25D และ 0.5D ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



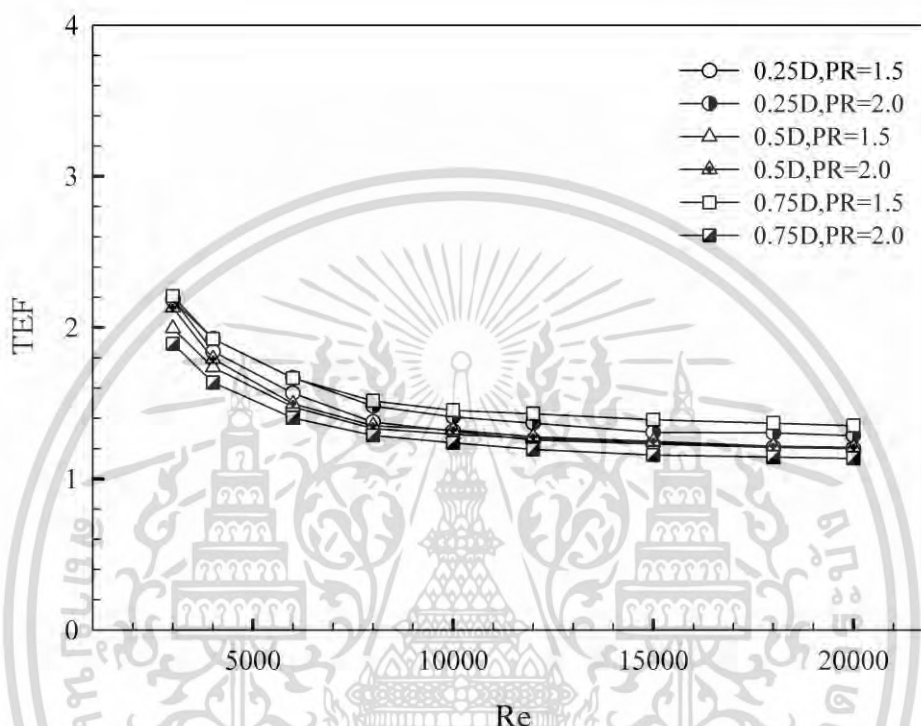
รูปที่ 5.64 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D



รูปที่ 5.65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) จารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับค่าเลขเรย์โนลด์ส (Re) ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D ซึ่งพิจารณาที่ค่า $a_r=0.6$ ที่ค่า PR=1.5 และ 2.0 ในช่วง $Re=3000 - 20,000$ ดังแสดงในรูปที่ 5.66



รูปที่ 5.66 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปทรงเพชร) พิจารณาระยะตัดที่ 3 ระยะ 0.25D, 0.5D และ 0.75D

จากรูปที่ 5.66 แสดงค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อน (Nu/Nu_0) กับอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0) ที่เกิดขึ้นที่ค่ากำลังขับเคลื่อนเดียวกัน ในท่อที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยที่ระยะพิตช์และมุมปะทะต่างกัน จากการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลข สังเกตเห็นว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นสำหรับทุกระยะพิตช์และมุมปะทะต่างๆ เนื่องจากความเร็วจากการไหลยังไม่พอต่อการผสมกันระหว่างอากาศร้อนที่บริเวณผนังท่อกับตรงกลางท่อ โดยผ่านท่อที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยกรณีระยะตัดที่ 0.75D $PR=1.5$ ให้ค่า TEF ดีที่สุดเท่ากับ 2.20 ที่ $Re=3000$

5.3 การอภิปรายผลงานวิจัย

จากการศึกษาเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมของผู้วิจัยพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาคือการใส่แหวนทรงกรวยสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหล และเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่เนื่องจากในงานวิจัยในอดีตนั้นส่วนมากจะนิยมใช้ แหวนทรงกรวยแบบมาตรฐานภายในท่อกลม ซึ่งพบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้ยังมีค่าสูงอยู่ ซึ่งมีผลทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าต่ำลง เนื่องจากอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบเสียดทานที่เพิ่มมากขึ้นกว่าหลายเท่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลกับการลดค่าตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งได้ทำการศึกษาลักษณะการจัดวางรูปแบบต่างๆ ศึกษาอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของทางเข้าและทางออก (aspect ratio, a_r) ที่เหมาะสม ปรับปรุงมุมปะทะการไหล (α) อัตราส่วนระยะพิทช์ (P_r) ปรับปรุงรูปร่าง จากการศึกษานี้พบว่าการวิจัยครั้งนี้พบว่าที่ลักษณะการวางแบบ CER ที่ค่า $a_r=0.6$ มุมปะทะการไหล 16.5° เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้พบว่ารูปแบบทรงรูปปลีมีที่ลักษณะการจัดวาง DER ที่มุมปะทะการไหล $\alpha=16.5^\circ, 25^\circ$ และ 30° ที่ $PR=1.5, 2.0$ และ 2.5 ของของกรวยวงรีปรับปรุงแบบทรงรูปปลีให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่เหมาะสมที่สุดในช่วง $1.18 - 2.39$ เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ พิจารณาที่ช่วงของเลขเรย์โนลด์ส์ $Re=3000 - 20,000$

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

6.1.1 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของค่าเลขเรย์โนลด์สพบว่าเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลง ส่วน f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นทำให้เกิดค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลถึงค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับกรณีที่ไม่ได้ทำมุมปะทะด้วย สำหรับกรณีที่ทำการศึกษา พบว่าที่ $Re = 20,000$ จะให้ค่า Nu/Nu_0 น้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผลที่เกิดขึ้นกับตัวประกอบเสียดทานยังต้องพิจารณาเป็นในแต่ละกรณีไป และนอกจากค่าเลขเรย์โนลด์สจะมีผลต่อ Nu/Nu_0 และ f/f_0 แล้วค่าเลขเรย์โนลด์สยังมีผลต่อความปั่นป่วนของการไหลอีกด้วย โดยเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์สสูงขึ้นจะทำให้เกิดการปั่นป่วนของการไหลมากขึ้นด้วย

6.1.2 อิทธิพลของมุมปะทะและระยะพิตช์

พิจารณาอิทธิพลของ PR พบว่า เมื่อค่า PR เพิ่มมากขึ้น ค่า Nu/Nu_0 และค่า f/f_0 จะมีค่าลดลง ส่วนที่ค่า PR ต่ำๆ จะให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 สูง เนื่องจากเมื่อลดค่า PR ทำให้ลักษณะการไหลของไหลมีระยะการไหลตามยาวที่สั้นลง ทำให้เกิดความปั่นป่วนการไหลหมุนวนมากขึ้นแต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงให้ค่าความดันตกคร่อมที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ขณะเดียวกันมุมตัดที่เหมาะสมก็ส่งผลเช่นเดียวกัน จึงต้องพิจารณาที่สมรรถนะเชิงความร้อนและค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

6.1.3 อิทธิพลของรูปร่าง

อิทธิพลของรูปร่างในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาทั้งหมด 2 แบบ คือ CER และ DER จากการศึกษาพบว่าเมื่อกำหนดรูปร่างทางเข้าแบบ DER ดีกว่า CER จึงนำมาปรับปรุงต่อ ซึ่งของไหลที่ไหลผ่านแหวนทรงกรวยส่งผลให้เกิดการไหลหมุนวนที่รุนแรงไปกระทบกับผนังท่อเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลเย็นบริเวณกลางท่อและของไหลร้อนบริเวณผนังท่อ ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นและค่าตัวประกอบเสียดทานก็เพิ่มตามไปด้วยเช่นกันแต่ในกรณีนี้จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดในงานวิจัยนี้ ที่ $TEF=2.39$

6.1.4 อิทธิพลของการปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างทางเข้าและทางออก

อิทธิพลของการปรับอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างทางเข้าและทางออกในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาทั้งหมด 3 ค่าที่ $a_r=0.4, 0.6,$ และ 0.8 ที่ค่า $Re=3000 - 20,000$ พบว่า $a_r=0.6$ เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด การเลือกจึงต้องเลือกมุมที่เหมาะสมและพอดี จนทำให้เกิดความปั่นป่วนการไหลหมุนวน และได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะและการพัฒนางานวิจัย

จากผลงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้ทราบว่า การใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับทดสอบหาพฤติกรรมการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม มีข้อดีเนื่องจากสามารถช่วยประหยัดเวลาที่ใช้ในการออกแบบการทดลองและลดต้นทุนสำหรับอุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลองได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นเพียงการทำนายถึงผลการจำลองที่มีความเป็นไปได้ สำหรับการนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ศึกษาไปใช้งานจริงนั้น ค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ได้ยังต้องคำนึงถึงความถูกต้องและแม่นยำของเครื่องมือวัดที่นำมาใช้ทำการศึกษาในงานจริงด้วย

สำหรับแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปนั้น เมื่อพิจารณาการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลม ซึ่งสามารถสร้างการหมุนวนของการไหล สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ แต่เนื่องจากในการศึกษารูปแบบของแหวนทรงกรวยรูปร่างต่างๆภายในท่อกลม นั้นยังให้ค่าความดันตกคร่อมที่สูงจึงมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนยังไม่สูงมากนัก จากการศึกษาพบว่าระยะพิตซ์และมุมปะทะการไหลที่ลดลงมีผลกับการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและลดค่าความดันตกคร่อมได้ดี ดังนั้นการศึกษาลักษณะรูปร่างอื่นเพิ่มเติมจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจต่อการนำไปศึกษาในอนาคตสำหรับปรับแต่งรูปแบบของแหวนทรงกรวยเพื่อสร้างการหมุนวนต่อไป

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] Promvong, 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] Promvong, 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] Promvong, 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] Promvongse, 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] Promvongse, 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.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

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

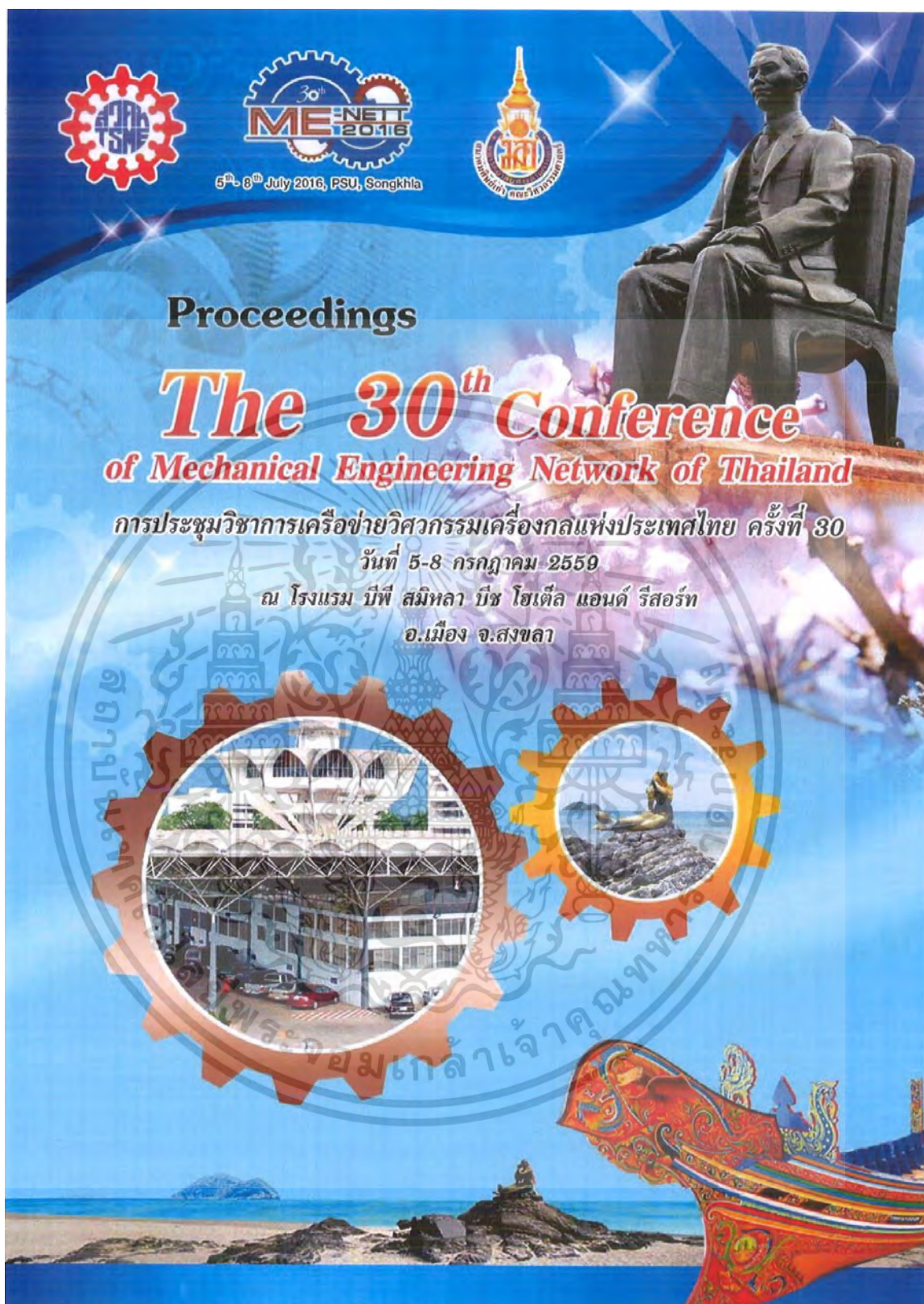
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CST0020

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อที่ใส่กรวยวงรี Numerical Heat Transfer Investigation in a Tube with Elliptical Conical Ring

ภณินิมิตร¹, สมบัติ ธานี^{2*}, สุรียา โชคเพิ่มพูน³, พงษ์ศักดิ์ คำมูล¹ และ พงษ์เจต พรหมวงษ์¹

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

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

³ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตคลองหลวง เลขที่ 199 หมู่ 3 ถนนพื้งโคน วรวิบูลย์ ตำบลพื้งโคน อำเภอวังน้อย จังหวัดลพบุรี 47160

*ติดต่อ: sombat_ae@ni.ac.th, โทรศัพท์ 0-2763-2600, โทรสาร 0-2763-2600 ต่อ 2900

บทคัดย่อ

ตัวสร้างการไหลปั่นป่วนชนิดแหวนกรวยวงรีตัด ได้ดัดแปลงจากกรวยแบบดั้งเดิมโดยการตัดทำมุม $\alpha=12.82^\circ$ กับแนวระนาบ ถูกใช้เพื่อสร้างการไหลหมุนวนในท่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า ($D_{in}=0.5$) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก ($D_{out}=0.9$) อัตราส่วนความรี ($E_r=d_1/d_2=d_x/d_y$) กำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.5 และที่อัตราส่วนระยะพิทช์แตกต่างกันที่ ($P_r=1.5, 2$ และ 2.5) ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ เท่ากับ 3000 ถึง 20,000 ในท่อที่มีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ผลจากการศึกษาเสนอในรูปแบบของการถ่ายเทความร้อน และค่าความดันตกคร่อมในรูปแบบของเลขนัสเซลท์และค่าตัวประกอบเสียดทาน ตามลำดับ ผลจากการศึกษาเชิงตัวเลขพบว่า กรวยวงรีที่ติดตั้งในท่อกลมช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ โดยกรวยวงรีดัดแปลงที่ $\alpha=12.82^\circ$ ให้ค่าความดันตกคร่อมมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรวยวงรีเดิม และพบว่าอัตราส่วนระยะพิทช์ $P_r=1.5$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด การใช้กรวยวงรีไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน แต่ยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลงในกรณีที่มี P_r สูงขึ้น

คำหลัก: เลขเรย์โนลด์ส์; การถ่ายเทความร้อน; กรวยวงรี; ฟลักซ์ความร้อน

Abstract

The truncated elliptical conical rings modified from the typical conical ring by cutting the cone-tip at $\alpha=12.82^\circ$ are used as a turbulator for producing the vortex flows to enhance the heat transfer rate in a tube. The conical rings having inlet diameter ratio, ($D_{in}=0.5$) and outlet diameter ratios, ($D_{out}=0.9$), ellipticity ($E_r=0.5$) at a single pitch ratio, ($P_r=1.5, 2, 2.5$) are introduced. The computation is carried out by varying the airflow rate for Reynolds number ranging from 3000 to 20,000 in the test section with a constant surface heat flux. The effects of the conical ring insert on heat transfer and pressure drop are in terms of Nusselt number and friction factor, respectively. The numerical results show that the modified conical-ring insert provides higher heat transfer rate than the typical ring and the smooth tube alone and also yields less friction factor than the typical one. The $P_r=1.5$ gives the highest heat transfer rate. The use of the conical elliptical rings not only affects the increase in heat transfer rate, but also friction decreased in the case of a higher P_r .

Keywords: Reynolds number; heat transfer; elliptical cone; heat flux

1. บทนำ

เนื่องจากการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านความร้อน การมีระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีจะส่งผลอย่างมากต่อการประหยัดพลังงาน ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการสร้างความปั่นป่วนให้กับการไหลของของไหลที่จะไปช่วยในการลดชั้นขีดผิวให้บางลง ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ได้ผลดีในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน การพิจารณาการไหลที่มีการปรับตัวเต็มที่ในท่อ (fully develop) และพิจารณาการไหลแบบเป็นคาบ (periodic) ได้ทำการศึกษาโดย Patankar และคณะ [1] ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลและพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนในท่อโดยการเพิ่มตัวสร้างการไหลปั่นป่วนในลักษณะต่าง ๆ โดยการใช้อุปกรณ์ความถี่ ตัวเลข Muthusamy และคณะ [2] ได้ศึกษาผลของอุปกรณ์สร้างการไหลความปั่นป่วนรูปกรวยต่อการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการสอดใส่กรวยภายในท่อกลมช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น Yakut และคณะ [3] ยังได้ศึกษาผลกระทบบของตัวสร้างการไหลปั่นป่วนต่อการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน ความดันตกคร่อมและการไหลที่เกิดจากการสั่นสะเทือน ต่อมา Promvong [4] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่สอดใส่แหวนทรงกรวย จากการทดลองพบว่าแหวนทรงกรวยมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน การจัดวางแหวนทรงกรวยส่งผลให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น การจัดวางแบบลู่เข้า (CR), แบบบานออก (DR) และแบบลู่เข้า-บานออก (CDR) ให้ค่าเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นถึง 197%, 333% และ 237% ตามลำดับ งานวิจัยต่อมา Elamsa-ard และคณะ [5] ได้ศึกษาเชิงการทดลองของการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการไหลในท่อที่มีการติดตั้งกรวยพรุน โดยศึกษาที่อัตราส่วนระยะพิตซ์ ($PR=4, 6$ และ 12) และจำนวนรูพรุนที่ต่างกัน ($N=4, 6$ และ 8 รู) โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ พบว่าการสอดใส่แหวนรูปกรวยพรุนส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น และ จำนวนรูพรุนของกรวยก็ส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของท่อด้วยเช่นกัน โดยการสอดใส่กรวยพรุนเข้าไปภายในท่อสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 137% เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีกรวยสอดใส่กรวย และให้

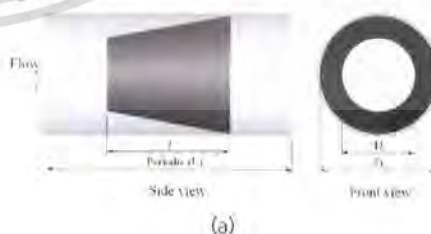
ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประมาณ 0.92 ที่ $PR=4$ และ $PR=8$ ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 4000 จากนั้น Anvari และคณะ [6] ได้ทำการวิจัยเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนในท่อที่สอดใส่แหวนทรงกรวยโดยใช้น้ำเป็นของไหลทดสอบ พบว่าตัวสร้างการไหลปั่นป่วนทรงกรวยมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน การจัดวางแหวนทรงกรวยแบบลู่เข้า (CR) มีค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 141% - 355% ในทางกลับกันสำหรับการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบบานออก (DR) ให้ค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 171% - 521% ขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ส์

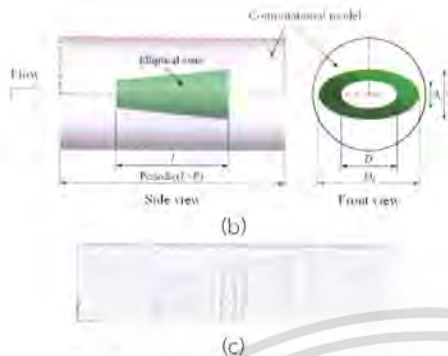
จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใส่แหวนทรงกรวยเข้าไปภายในท่อกลมมีผลในการสร้างความปั่นป่วนให้แก่การไหล และยังทำให้ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีกรวยสอดใส่เข้าไปภายใน แต่ขณะเดียวกันความเสียดทานยังคงสูงมากตาม งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะลดความเสียดทานจากการไหลผ่านกรวย โดยการดัดแปลงเป็นกรวยวงรี อีกทั้งยังดัดปลายกรวยให้เอียง ซึ่งคาดหวังว่ากรวยวงรีจะสร้างการไหลหมุนวนตามแนวยาว และช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น

2. โครงสร้างการไหลและสมการที่เกี่ยวข้อง

2.1. กรวยวงรีและการจัดวาง

แบบจำลองที่ทำการศึกษาคือท่อกลมที่มีการใส่ตัวสร้างการไหลหมุนวนกรวยวงรี โดยต่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D=50$ mm กรวยวงรีมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า $D_{Ri}=D_i/D=0.5$ และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก $D_{Ro}=D_o/D=0.9$ มีอัตราส่วนความถี่ $E_i=d/D_i=d/D_o=0.5$ และที่อัตราส่วนระยะพิตซ์ $P_R=P/D=1.5, 2.0$ และ 2.5 ตามลำดับ โดยพิจารณาการไหลแบบ periodic ซึ่งกรวยวงรี (ยังไม่มีการดัดแปลง) และกรวยแบบดั้งเดิม มีความยาวกรวย $l=D$ และปลายกรวยมีทิศทางชี้ทวนกระแสการไหล ดังแสดงในรูปที่ 1





รูปที่ 1 ลักษณะการติดตั้ง (a) กรวยแบบดั้งเดิม (b) กรวยวงรี และ (c) กริดที่ใช้ในการคำนวณ

2.2. สมมติฐานและสมการในการคำนวณ

ในการศึกษาใช้วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสับเนื่อง (FVM) ด้วยแบบจำลองการไหล 3 มิติที่มีการไหลแบบปั่นป่วน เป็นการไหลแบบคงตัวและไร้การอัดตัว ในช่วงเลขเรย์โนลด์ส 3000 - 20,000 โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ไม่คำนึงแรงวัตถุและการสูญเสียเนื่องจากความหนืด ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\epsilon$ พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน ทำการศึกษาการไหลในท่อกลมที่มีการให้ความร้อนแบบพักซ์ความร้อนที่ผนังท่อคงที่ โดยใส่ตัวสร้างการไหลหมุนวนกรวยวงรีลักษณะการติดตั้งแสดงดังรูปที่ 1 สำหรับการไหลในท่อกลมสมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน สามารถแสดงในรูปแบบเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังนี้

สมการความต่อเนื่อง:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม:

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

สมการพลังงาน:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\Gamma + \Gamma_r) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

เมื่อ Γ และ Γ_r คือ การแพร่ทางความร้อนและการแพร่ทางความร้อนแบบปั่นป่วนตามลำดับ

$$\Gamma = \frac{\mu}{Pr} \quad \text{และ} \quad \Gamma_r = \frac{\mu_r}{Pr_r} \quad (4)$$

สมการควบคุมทั้งหมดจะทำการคำนวณหาผลเฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสับเนื่องโดยแบบแผนวิธี SIMPLE ในการรู้เข้าหาค่าตอบจะพิจารณาที่ความแตกต่างของค่าการแปรเปลี่ยนน้อยกว่า 10^{-5} ของทุกตัวแปร ยกเว้นสมการพลังใช้ค่าการแปรเปลี่ยนน้อยกว่า 10^{-9}

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ เลขเรย์โนลด์ส ตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซลท์ และสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์สนิยามโดย

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

เมื่อ \bar{V} และ ν คือความเร็วเฉลี่ย และความหนืดจลน์ของอากาศ ตามลำดับ

ค่าความดันสูญเสียแสดงในรูปของตัวประกอบเสียดทาน, f คำนวณได้จากความดันตกคร่อม, ΔP ตลอดช่วงความยาว periodic ของแบบจำลอง, L และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลม D

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

การถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปเลขนัสเซลท์ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

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

สมรรถนะเชิงความร้อน, TEF

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

เมื่อ Nu_0 และ f_0 คือ เลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ ตามลำดับ

2.3. เงื่อนไขขอบเขต

ขอบเขตของการศึกษาได้ทำการพิจารณาทางเข้าและทางออกเป็นแบบ periodic translation สมมติอากาศที่ 300 K ไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่รูปร่างความเร็วทางเข้าและทางออกเหมือนกัน คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศคงที่โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ย

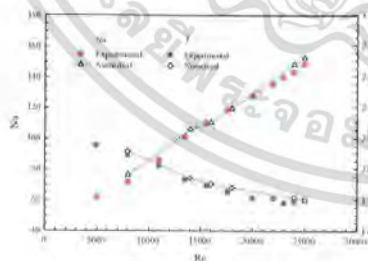
ทางเข้า เงื่อนไขขอบเขตไม่ลื่นไหลที่ผนัง หรือความเร็วที่ผนังมีค่าเป็นศูนย์ ผนังที่อยู่กับที่ กำหนดให้ผนังของท่อกลมมีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ 600 W/m^2 และให้กรวยวงรีเป็นฉนวน (ความร้อนไม่สามารถผ่านได้)

กริดที่ใช้สำหรับงานวิจัยที่มีการใส่กรวยวงรีภายในท่อกลม จะใช้การแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (non-uniform grid) ซึ่งจะพิจารณาบริเวณผนังให้มีจำนวนกริดหนาแน่นโดยออกแบบกริดให้เป็นชั้น layer ส่วนบริเวณที่ห่างจากผนังกำหนดให้จำนวนกริดเบาบางลง ลักษณะกริดจะเป็นแบบวงรี (หกเหลี่ยม) แต่กรวยวงรีที่ใส่ในท่อจะเป็นกริดแบบสี่เหลี่ยม ส่วนในการหาผลกระทบของกริดที่มีผลต่อการหาค่าตอบได้ทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณกริดที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 179854, 275497 และ 474352 ตามลำดับ พบว่าเมื่อจำนวนกริดมากกว่า 275497 ให้ค่า Nu และ f มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.2% จึงเลือกจำนวนกริด 275497 มาใช้ในการศึกษา

3. ผลการคำนวณและการอภิปราย

3.1. การตรวจสอบผลการคำนวณเชิงตัวเลข

การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณเชิงตัวเลขได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองของ Promwong [4] ที่เงื่อนไขเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นกรณีของท่อกลมที่ใส่กรวยแบบสี่เหลี่ยม (CR) จากผลการตรวจสอบพบว่า ผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และยังพบว่าค่าเลขนัสเซลที่มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 7.4% และให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของตัวประกอบเสียดทานอยู่ที่ 7.6%



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu และ f กับค่า Re

3.2. กรวยวงรีและกรวยวงรีดัดแปลง

จากการศึกษาได้ใส่กรวยวงรีภายในท่อกลม 2 แบบ คือ กรวยวงรี และกรวยวงรีดัดแปลง โดยกรวยวงรีทั้ง 2

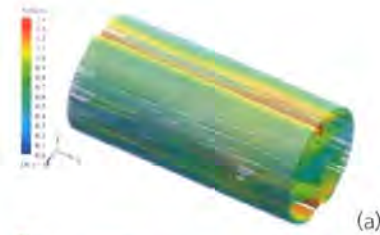
มีค่า $D_{in}=0.5$, $D_{ro}=0.9$ ที่มีอัตราส่วนความรี $E_r=0.5$ กรวยวงรีมีค่า P_R หนึ่งค่า คือ $P_R=2$ ส่วนกรวยวงรีดัดแปลงได้ทำการดัดมุมที่ปลายกรวยหนึ่งมุมคือ $\alpha=12.82^\circ$ ซึ่งเป็นมุมน้อยสุดที่กรวยจะไม่ขาดออกจากกัน มีอัตราส่วนระยะพิทช์ 3 ค่า คือ $P_R=1.5$, 2 และ 2.5 ตามลำดับ โดยกรวยวงรีดัดแปลงได้แสดงในรูปที่ 3



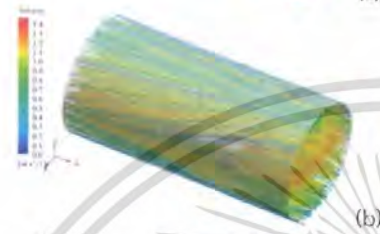
รูปที่ 3 กรวยวงรีดัดแปลงที่ $\alpha=12.82^\circ$

3.3. พฤติกรรมการไหล

ลักษณะของการไหลในท่อกลมที่ใส่กรวยวงรีที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า $D_{in}=0.5$ และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก $D_{ro}=0.9$ อัตราส่วนความรี ($E_r=0.5$) และที่อัตราส่วนระยะพิทช์ $P_R=1.5$, 2 และ 2.5 ตามลำดับ และวิเคราะห์ที่ค่า $Re=3000-20,000$ จากรูปที่ 4 (a) แสดงโครงสร้างการไหลของอากาศภายในท่อที่มีการติดตั้งกรวยวงรีและกรวยวงรีดัดแปลง โดยจัดวางกรวยวงรีแบบปลายกรวยชี้ทวนกระแสการไหล พบว่าเมื่ออากาศไหลผ่านท่อที่มีการติดตั้งกรวยวงรี กระแสการไหลค่อนข้างราบเรียบ ดังรูป 5 (a) แต่มีบางส่วนจะถูกบีบให้แคบลงระหว่างบริเวณผนังด้านข้างของแผ่นกรวย ทำให้อากาศไหลกระทบที่ผนังด้านข้าง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การใส่กรวยวงรี ยังทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทาน จึงทำการการดัดแปลงดัดปลายกรวยวงรีที่ $\alpha=12.82^\circ$ ดังรูปที่ 4 (b) แสดงให้เห็นว่าการใส่กรวยวงรีดัดแปลงช่วยเพิ่มการปั่นป่วนของกระแสการไหลและเกิดการไหลหมุนวนตามแนวยาว เมื่อเปรียบเทียบกับกรวยวงรี จากรูปที่ 5 (b) แสดงเส้นกระแสการไหลที่ระนาบตัดขวางต่างๆ พบว่ากรวยวงรีดัดแปลงเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนวนคู่ 2 คู่ เมื่อพิจารณาที่ผนังท่อด้านข้าง คู่กระแสการไหลหมุนวนมีทิศพุ่งเข้าสู่ผนัง (common flow down vortices) เกิดการไหลกระแทกที่บริเวณผนังด้านข้าง ทำให้ชั้นขอบเขตความร้อนที่ผนังท่อบางลง ส่งผลให้เกิดแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่าท่อเปล่าและท่อที่มีกรวยวงรี



(a)



(b)

รูปที่ 4 กระแสการไหลในท่อที่มี (a) กรวยวงรี และ (b) กรวยวงรีดัดแปลง



(a)



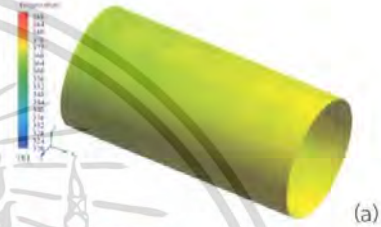
(b)

รูปที่ 5 กระแสการไหลบนระนาบตัดขวางต่างๆ ในท่อที่มี (a) กรวยวงรี และ (b) กรวยวงรีดัดแปลง

3.4. พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

การกระจายอุณหภูมิที่ผิวท่อ ดังแสดงในรูปที่ 6 สำหรับกรณี 6 (a) แสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่ผิวท่อสำหรับกรณีท่อเปล่าผิวเรียบ พบว่าท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีการใส่กรวยวงรี เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังท่อไม่ดี โดยสังเกตที่ผิวท่อยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ และเมื่อทำการติดตั้งกรวยวงรี ดังรูปที่ 6 (b) จะเห็นได้ว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังท่อ ทำให้ผนังท่อ มีอุณหภูมิลดลงแต่ยังไม่มากนัก ยังมีบางบริเวณที่ยัง

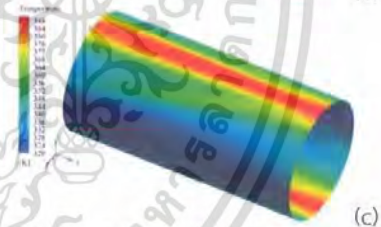
แลกเปลี่ยนอุณหภูมิได้น้อย จึงได้ทำการดัดแปลงมุมกรวยที่ $\alpha=12.82^\circ$ เพื่อช่วยให้การกระจายการลดอุณหภูมิมีบริเวณมากขึ้น จะเห็นได้ในรูปที่ 6 (c) จะพบว่ามีการถ่ายเทความร้อนได้ดีบริเวณผนังด้านข้าง เนื่องจากกระแสการไหลหมุนวนกระแทกที่ด้านข้างจะเห็นได้จากอุณหภูมิที่ลดต่ำลง จะเห็นสีฟ้าไล่ไปจนเป็นสีน้ำเงิน แต่การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวท่อด้านบน และด้านล่างยังไม่ดีพอ จะเห็นได้จากบริเวณที่มีสีแดง



(a)



(b)

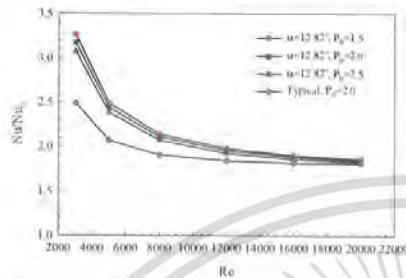


(c)

รูปที่ 6 คอนทิวรัลอุณหภูมิบนผนังท่อ (a) ท่อเปล่า (b) ใส่กรวยวงรี และ (c) ใส่กรวยวงรีดัดแปลง $\alpha=12.82^\circ$ ที่ $P_R=2, Re=3000$

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่มีการติดตั้งกรวยวงรีและกรวยวงรีดัดแปลง จากการศึกษาผลที่ได้พบว่าเมื่อลดอัตราส่วนระยะพิทช์ มีผลทำให้เลขนัสเซลที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จากกราฟพบว่าอัตราส่วนเลขนัสเซลของ $P_R=1.5, 2,$ และ 2.5 ที่พิจารณาในช่วงเลขเรย์โนลด์ส $3000 - 20,000$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลอยู่ในช่วง $1.82 - 3.08$ โดยที่ $P_R=1.5$ และ $Re=3000$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลที่สูงที่สุด 3.08 เท่า

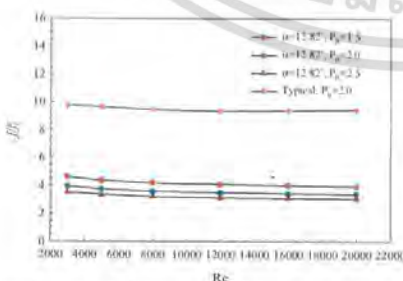
เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีการติดตั้งกรวยวงรีภายใน ขณะเดียวกันกรณีกรวยวงรีดัดแปลงให้ค่า Nu/Nu_0 มากกว่ากรวยวงรีเดิมที่ P_R เดียวกัน



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 กับ Re สำหรับกรวยวงรี และกรวยวงรีดัดแปลง

3.5 การสูญเสียความดัน

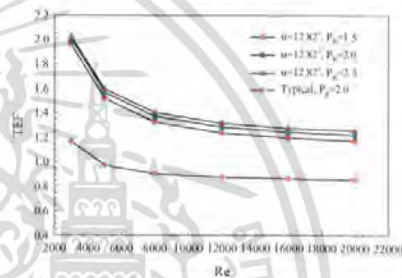
สำหรับค่าความดันสูญเสียหรือค่าความดันตกคร่อมแสดงในรูปของอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทาน พบว่ากรวยวงรีให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงกว่ากรวยวงรีดัดแปลงมุมทุกๆ ค่า P_R และพบว่าเมื่อทำการดัดแปลงมุมกรวยที่ $\alpha=12.82^\circ$ ช่วยลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ในขณะที่ P_R มากขึ้นค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลง ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 8 โดยที่ค่า $D_{in}=0.5$, $D_{out}=0.9$ และ $EI=0.5$ ขณะที่ $P_R=1.5$ ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุด 4.62 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ แต่เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนระยะพิทช์จึงช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นเหตุผลให้ทำการดัดแปลงกรวยวงรีที่ $\alpha=12.82^\circ$ ถ้าเปรียบเทียบกับกรวยวงรีเดิม กรวยวงรีดัดแปลงจะสามารถลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลงได้มากกว่า ขณะเดียวกันกรณีกรวยวงรีดัดแปลงให้ค่า f/f_0 น้อยกว่ากรวยวงรีเดิมที่ P_R เดียวกันถึง 5 เท่า



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงค่า f/f_0 กับ Re สำหรับกรวยวงรี และกรวยวงรีดัดแปลง

3.6 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่มีการติดตั้งกรวยวงรีและกรวยวงรีดัดแปลง ที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า $D_{in}=0.5$ และทางออกที่ $D_{out}=0.9$ โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิทช์ที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ $P_R=1.5$, 2 และ 2.5 พบว่าที่ $P_R=2.5$ ที่อัตราส่วนความรี $EI=0.5$, $Re=3000 - 20,000$ พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่ามากที่สุดถึง 2.02 เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของกรวยวงรีจะมีค่าน้อยกว่ากรวยวงรีดัดแปลงที่ P_R เดียวกัน



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงค่า TEF กับ Re สำหรับกรวยวงรี และกรวยวงรีดัดแปลง

4. สรุปผลการคำนวณ

จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อทรงกลมที่มีการติดตั้งกรวยวงรีและกรวยวงรีดัดแปลง โดยกำหนดอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_{in}=0.5$ ที่ $D_{out}=0.9$, $EI=0.5$ พิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิทช์ $P_R=1.5$, 2, 2.5 พบว่าเมื่อใส่เมื่อใส่กรวยวงรี จะทำให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าน้อย ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการดัดแปลงกรวยวงรี เพื่อลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน โดยดัดแปลงกรวยวงรีที่ $\alpha=12.82^\circ$ จากการศึกษพบว่าเมื่อทำการดัดแปลงกรวยวงรีทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้นโดยที่ $D_{in}=0.5$, $D_{out}=0.9$, $EI=0.5$, $P_R=2.5$ ที่ $Re=3000$ ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ 2.02 และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนเลขนัสเซลท์พบว่าที่ $D_{in}=0.5$, $D_{out}=0.9$, $EI=0.5$, $P_R=1.5$ ที่ $Re=3000$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงที่สุดที่ 3.08 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

CST0020

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



5. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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, *ASME J. HeatTransfer*, vol. 99(2), May 01, pp. 180-186.
- [2] Muthusamy, C., Vivar, M., Skryabin, I. and Srithar, K. (2013). 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, May 2013, pp. 64-68.
- [3] Yakut, K., Sahin, B., and Canbazoglu, S. (2004). Flow induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers, *Applied Energy*, vol. 78, July 2004, pp. 273-288.
- [4] Promvongse, P. (2008). Heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts, *Energy Conversion and Management*, vol.49, January 2008, pp. 8-15
- [5] Eiamsa-ard, S. (2010). 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, May 2010, pp. 560-567
- [6] Anvari, A.R., Lotfi, R., Rashidi, A.M., and Sattari, S. (2011). 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, May 2011, pp. 668-671.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาว ภณิดา ผลนิมิตร
วัน เดือน ปีเกิด	30 กรกฎาคม 2533
ที่อยู่	20 หมู่ 7 ตำบลบ้านเกาะ อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา รหัสไปรษณีย์ 13000
เบอร์โทร	085-0701098
ประวัติการศึกษา	2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2558	ตำแหน่งครูและธุรการฝ่ายปกครอง โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ 499 ถนนพัฒนาการ แขวงพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250
พ.ศ. 2559-2560	ตำแหน่ง Sales Engineer บริษัท แคมฟิล(ประเทศไทย) 202 อาคารเลอคองคอร์ด ห้องA305 ชั้นA3 ถนนรัชดาภิเษก ห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10310
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	
พ.ศ.2559	งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30 (5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา) ในหัวข้อ การศึกษาการถ่ายเท- ความร้อนเชิงตัวเลขในท่อที่ใส่กรวยวงรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้