

การถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแหวนวงรี  
Numerical Heat Transfer in a Heat Exchanger Tube with Elliptical Rings



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


การถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแหวนวงรี  
Numerical Heat Transfer in a Heat Exchanger Tube with Elliptical Rings



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Numerical Heat Transfer in a Heat Exchanger Tube with Elliptical Rings



Krittapas Thienopas  
Tom Somchaiwong  
Piyawat Buathongchan

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
2019



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบบางวงรี

นายกฤตภาส	เชียรโอภาส	59010029
นายทม	สมใจวงษ์	59010516
นายปิยะวัฒน์	บัวทองจันทร์	59010867
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2562

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ ANSYS (FLUENT) ในการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่เคลื่อนที่ภายในท่อที่ผนังมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ และติดตั้งแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี ซึ่งแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อและนำของไหลเย็นไปสัมผัสผนังร้อน โดยในการทดสอบใช้ของไหลเป็นอากาศที่มีอัตราการไหลในช่วงค่าเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) ระหว่าง 3,000 และ 15,000 ของไหลจะถูกทำการทดสอบเพื่อศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number, Nu) และการสูญเสียความดันในรูปตัวประกอบเสียดทาน (friction Factor,  $f$ ) โดยแผ่นกั้นการไหลถูกทดสอบโดยใช้อัตราส่วนความสูงของแผ่นกั้นการไหลกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหรืออัตราส่วนขัดขวาง (blockage Ratio, BR) 3 ค่า คือ 0.05, 0.1 และ 0.15 อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความยาวด้านของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรืออัตราส่วนพิชต์ (Pitch Ratio, PR) 3 ค่า คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 มุมปะทะ (angle of Attack,  $\alpha$ ) 3 ค่า คือ 30°, 45° และ 60° จากนั้นจึงพัฒนาครีบบางวงรีด้วยการพับครีบบางวงรีเป็นรูปตัววีเพื่อที่จะเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ และเจาะรูเพื่อที่จะลดตัวประกอบเสียดทาน และเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในจุดที่เป็นมุมอับ โดยประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดูจากค่าตัวประกอบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Thermal Enhancement Factor, TEF) จากการศึกษพบว่าท่อที่ทำการติดตั้งแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีอัตราส่วนขัดขวางเท่ากับ 0.05 อัตราส่วนพิชต์เท่ากับ 1.0 มุมปะทะเท่ากับ 30° ถูกพบเป็นรูปตัววีในทิศทางสวนกระแสการไหล ถูกนำไปเจาะรูขนาด 80% ของอัตราส่วนบล็อกการไหลเป็นจำนวน 8 รู และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุม 7.5° สามารถเพิ่มค่าตัวประกอบสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน เท่ากับ 2.92 ที่เลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 3,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Numerical Heat Transfer in a Heat Exchanger Tube with Elliptical Rings

Krittapas	Thienopas	59010029
Tom	Somchaiwong	59010516
Piyawat	Buathongchan	59010867
Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvongse	Advisor	
Academic Year 2019		

### Abstract

This project aims to present the simulation of heat transfer enhancement in tube by a commercial software, called ANSYS (FLUENT), to analyze the behaviors of three-dimensional turbulent flow and heat transfer in tube with elliptical rings. The elliptical rings cause the turbulent vortex flows inside the tube and help convey the cold fluid in the central core into the tube wall regions. In the simulation test, air was used as the test fluid in the range of Reynolds Number ( $Re$ ) between 3,000 and 15,000 whereas the use of the rings resulted in the greater increase of heat transfer and the pressure drop in the form of Nusselt Number ( $Nu$ ) and friction Factor ( $f$ ), respectively. The ring parameters were three relative ring width or blockage ratio ( $BR=w/d$ ): 0.05, 0.1, and 0.15; three pitch ratios ( $PR=p/D$ ): 0.5, 1.0, and 1.5; and three angles of attack ( $\alpha$ ):  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , and  $60^\circ$ . In the simulation, the inclined elliptical rings were further developed by folding it into a V-shape for enhancing the turbulent flow and perforating the rings to decrease the friction factor and increasing the heat transfer at the dead zone or blind corner. Thermal performance indicator was employed using the Thermal Enhancement Factor (TEF). From the study, the tube with V-shaped elliptical rings at  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$  and  $\alpha = 30^\circ$  in the V-upstream flow direction and perforated by 8 holes with its size ( $d/w$ ) of 80% and its lids opened at  $7.5^\circ$  gives the best. This tube has the highest thermal enhancement factor (TEF) around 2.92 at  $Re = 3,000$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบน้ำมันวงรีสำเร็จลุล่วงไปได้โดยความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งทางกลุ่มผู้ทำงานวิจัยต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สมชาย ศรีพัฒนาพิพัฒน์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการศึกษาวิจัยซึ่งเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ผู้ร่วมงานจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือซ้ำพเจ้าในทุก ๆ ด้านที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี



นายกฤตภาส

เชียรโอภาส

นายทม

สมใจวงศ์

นายปิยะวัฒน์

บัวทองจันทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 สมมติฐาน.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน.....	4
2.2.1 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับของไหล.....	4
2.2.2 การไหลในท่อกลม.....	4
2.2.3 การไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลม.....	5
2.2.4 การไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลม ( $Re > 4000$ ).....	6
2.2.5 ค่าตัวประกอบความเสียดทาน.....	6
2.2.6 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน.....	7
2.2.6.1 วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน.....	7
2.2.6.2 สภาวะการถ่ายเทความร้อน.....	8
2.2.6.3 สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน.....	9
2.2.6.4 การพาความร้อน.....	9
2.3 การคำนวณการไหลแบบชั่วเป็นช่วง.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.1 การไหลช้าเป็นช่วงเชิงความเร็ว.....	12
2.3.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลช้าเป็นช่วง.....	12
2.3.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลช้าเป็นช่วง.....	13
2.3.2 การไหลช้าเป็นช่วงความร้อน.....	13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.4.1 Pongjet Promvong et al. (2013).....	14
2.4.2 Pongjet Promvong et al. (2014).....	15
2.4.3 C. Zhai et al. (2018).....	16
บทที่ 3 แบบจำลองและขั้นตอนการศึกษา.....	17
3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	17
3.2 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณ.....	18
3.3 วิธีการดำเนินการศึกษา.....	19
3.4 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	19
3.5 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม.....	21
3.6 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบเสียดทาน.....	23
3.6.1 แผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน.....	23
3.6.2 อิทธิพลของความกว้างของแผ่นกั้นการไหล.....	28
3.6.3 อิทธิพลของพิตช์.....	32
3.6.4 อิทธิพลของมุมปะทะ.....	36
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	41
4.1 การพัฒนาแผ่นกั้นการไหลโดยการพับเป็นรูปตัววี.....	41
4.2 การพัฒนาแผ่นกั้นการไหลโดยการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ.....	46
4.2.1 การเลือกขนาดรูที่เหมาะสม.....	46
4.2.2 การเลือกจำนวนรู และมุมการเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะที่เหมาะสม.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะและการพัฒนางานวิจัย.....	55
บรรณานุกรม.....	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางแสดงจำนวนกริดเซลล์ เลขนี้สเซลล์ท์ เปอร์เซ็นต์ความคลาดของเลขนี้สเซลล์ท์ ความดันตกคร่อม และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความดันตกคร่อม ที่อัตราส่วนพิตช์ (PR) 1.0.....	21
4.1 ตารางแสดงผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขของท่อกลมที่มีการตีแผ่กั้นการไหลรูปวงรีที่มีการเจาะรูขนาดต่าง ๆ.....	47
5.1 สรุปลผลที่ได้จากแผ่นกั้นการไหลที่ดีที่สุดในแต่ละกรณี.....	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การไหลภายในท่อกลม.....	5
2.2 แผนภาพของ Moody.....	7
2.3 แสดงรูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง.....	12
2.4 ท่อกลมที่มีการติดวงแหวนกั้นการไหล.....	14
2.5 ท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปเกือกม้า.....	15
2.6 ท่อกลมที่มีการติดปีกกั้นการไหลสามเหลี่ยมคู่.....	16
3.1 ค่าของเลขนัสเซิลท์จากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\epsilon$ เทียบกับผลการทดลอง.....	20
3.2 ค่าของตัวประกอบเสียดทานจากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\epsilon$ เทียบกับผลการทดลอง.....	20
3.3 รูปร่างของกริดเซลล์ของท่อกลม.....	22
3.4 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีแบบพื้นฐานที่ BR=0.10, PR=1.0, $\alpha=45^\circ$ .....	23
3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐานที่ BR=0.10, PR=1.0, $\alpha=45^\circ$ .....	24
3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐานที่ BR=0.10, PR=1.0, $\alpha=45^\circ$ .....	24
3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐานที่ BR=0.10, PR=1.0, $\alpha=45^\circ$ .....	25
3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐานที่ BR=0.10, PR=1.0, $\alpha=45^\circ$ .....	25
3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐานที่ BR=0.10, PR=1.0, $\alpha=45^\circ$ .....	26
3.10 การเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติของท่อกลมที่ไม่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี และท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน.....	27
3.11 การเปรียบเทียบคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิบนท่อกลมที่ไม่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูป วงรี และท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน.....	27
3.12 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า PR=1.0, BR=0.05, $\alpha=45^\circ$ .....	28
3.13 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า PR=1.0, BR=0.10, $\alpha=45^\circ$ .....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า PR=1.0, BR=0.15, $\alpha=45^\circ$ .....	28
3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ PR=1.0, $\alpha=45^\circ$ ระหว่าง BR=0.05, BR=0.10 และ BR=0.15.....	29
3.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ PR=1.0, $\alpha=45^\circ$ ระหว่าง BR=0.05, BR=0.10 และ BR=0.15.....	29
3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ (Nu/Nu <sub>0</sub> ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ PR=1.0, $\alpha=45^\circ$ ระหว่าง BR=0.05, BR=0.10 และ BR=0.15.....	30
3.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ PR=1.0, $\alpha=45^\circ$ ระหว่าง BR=0.05, BR=0.10 และ BR=0.15.....	30
3.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ PR=1.0, $\alpha=45^\circ$ ระหว่าง BR=0.05, BR=0.10 และ BR=0.15.....	31
3.20 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า PR=0.5, BR=0.05, $\alpha=45^\circ$ .....	32
3.21 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า PR=1.0, BR=0.05, $\alpha=45^\circ$ .....	32
3.22 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า PR=1.5, BR=0.05, $\alpha=45^\circ$ .....	32
3.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, $\alpha=45^\circ$ ระหว่าง PR=0.5, PR=1.0 และ PR=1.5.....	33
3.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, $\alpha=45^\circ$ ระหว่าง PR=0.5, PR=1.0 และ PR=1.5.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ $BR=0.05$ , $\alpha=45$ ระหว่าง $PR=0.5$ , $PR=1.0$ และ $PR=1.5$ .....	34
3.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ $BR=0.05$ , $\alpha=45$ ระหว่าง $PR=0.5$ , $PR=1.0$ และ $PR=1.5$ .....	34
3.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ $BR=0.05$ , $\alpha=45$ ระหว่าง $PR=0.5$ , $PR=1.0$ และ $PR=1.5$ .....	35
3.28 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า $PR=1.0$ , $BR=0.05$ , $\alpha=30^\circ$ .....	36
3.29 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า $PR=1.0$ , $BR=0.05$ , $\alpha=45^\circ$ .....	36
3.30 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า $PR=1.0$ , $BR=0.05$ , $\alpha=60^\circ$ .....	36
3.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลล์ท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ $BR=0.05$ , $PR=1.0$ ระหว่าง $BR=0.05$ , $BR=0.10$ และ $BR=0.15$ .....	37
3.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ $BR=0.05$ , $PR=1.0$ ระหว่าง $\alpha=30^\circ$ , $\alpha=45^\circ$ และ $\alpha=60^\circ$ .....	37
3.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ $BR=0.05$ , $PR=1.0$ ระหว่าง $\alpha=30^\circ$ , $\alpha=45^\circ$ และ $\alpha=60^\circ$ .....	38
3.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ $BR=0.05$ , $PR=1.0$ ระหว่าง $\alpha=30^\circ$ , $\alpha=45^\circ$ และ $\alpha=60^\circ$ .....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, PR=1.0 ระหว่าง $\alpha=30^\circ$ , $\alpha=45^\circ$ และ $\alpha=60^\circ$ .....	39
3.36 การเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน และท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีค่า PR=0.5, BR=0.05, $\alpha=30^\circ$ .....	40
3.37 การเปรียบเทียบคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิบนท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน และท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีค่า PR=0.5, BR=0.05, $\alpha=30^\circ$ .....	40
4.1 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ , V-Upstream.....	42
4.2 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ , V-Downstream.....	42
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลล์ท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ ระหว่าง BR=0.05, BR=0.10 และ BR=0.15.....	42
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ ระหว่าง V-Upstream และ V-Downstream.....	43
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ ระหว่าง V-Upstream และ V-Downstream.....	43
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ ระหว่าง V-Upstream และ V-Downstream.....	44
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ ระหว่าง V-Upstream และ V-Downstream.....	44

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 การเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหล รูปวงรีแบบปกติ และท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกพับเป็นรูปตัววี ในทิศทางสวนกระแส หรือ V-Upstream .....	45
4.9 การเปรียบเทียบคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิบนท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหล รูปวงรีแบบปกติ และท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกพับเป็นรูปตัววี ในทิศทางสวนกระแส หรือ V-Upstream .....	45
4.10 ภาพแสดงขนาด และลักษณะของการเจาะรูที่แผ่นกั้นการไหล.....	46
4.11 ภาพแสดงลักษณะการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ ที่แผ่นกั้นการไหล.....	48
4.12 ภาพแสดงลักษณะการเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ ที่แผ่นกั้นการไหล.....	48
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลล์ท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ , V-Upstream ระหว่างการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ.....	49
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ , V-Upstream ระหว่างการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ.....	49
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ , V-Upstream ระหว่างการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ.....	50
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ , V-Upstream ระหว่างการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ.....	50
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ , V-Upstream ระหว่างการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ.....	51
4.18 การเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหล ที่ถูกพับเป็นรูปตัววี และท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกพับเป็นรูปตัววี เจาะรูเป็นจำนวน 8 รู และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุม $7.5^\circ$ .....	51

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 การเปรียบเทียบคอนทัวร์ของการกระจายอนุกรมบนทอกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหล ที่ถูกรับเป็นรูปตัววี และทอกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกรับเป็นรูปตัววี เจาะรูเป็นจำนวน 8 รู และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกรับออกเป็นมุม $7.5^\circ$ .....	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัด, $m^2$
BR	อัตราส่วนบล็อกการไหล
$c_p$	ความร้อนจำเพาะ, $J/kg \cdot K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m
$D_e$	เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล, m
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูกลม, m
$f$	ค่าตัวประกอบเสียดทาน
$f_0$	ค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ
g	ตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, $m/s^2$
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$
$h_0$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของผิวเรียบ, $W/m^2 \cdot K$
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, $W/m^2 \cdot K$
L	ความยาวช่วงหนึ่งของการไหล, m
$L_p$	ความยาวเส้นรอบรูป, m
$\bar{L}$	เวกเตอร์ความยาวที่เข้าเป็นช่วงของขอบเขตการไหล
$\dot{m}$	อัตราการไหล, $kg/s$
$Nu$	เลขนัสเซลท์
$Nu_0$	เลขนัสเซลท์ของท่อผิวเรียบ
n	จำนวนรูที่เจาะ
$\Delta P$	ค่าความดันตกคร่อม, $N/m^2$
PR	อัตราส่วนพิตช์
Pr	เลข Prandtl
p	ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นการไหลรูปตัววงรี, m
$p(\bar{r})$	ความดันที่เข้ากันเป็นช่วง
$q_s''$	ฟลักซ์ความร้อน, $W/m^2$
Re	เลขเรย์โนลด์
$\bar{r}$	เวกเตอร์บอกตำแหน่ง
T	อุณหภูมิของไหล, $^{\circ}C$
TEF	ค่าสมรรถนะเชิงความร้อน
U	ความเร็วกระแสหลัก, $m/s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งข้ออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$U_c$	ความเร็วที่จุดศูนย์กลางของท่อ, m/s
$u_0$	ความเร็วของของไหลภายในท่อ, m/s
$V$	ความเร็วเฉลี่ยในการไหล, m/s
$w$	ความกว้างของแผ่นกั้นการไหล, m
$\alpha$	มุมปะทะของแผ่นกั้นการไหล, °
$\beta$	องศาของการเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะ, °
$\beta \vec{r} $	ส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดัน
$\rho$	ความหนาแน่น, kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	ความหนืด, N·s/m <sup>2</sup>
$\sigma$	เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ
$\nu$	ปริมาตรจำเพาะ, m <sup>2</sup> /s
$\gamma$	น้ำหนักจำเพาะ, N/m <sup>3</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากในปัจจุบันมีความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะในด้านอุตสาหกรรมทางความร้อน ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ เครื่องมือ และเครื่องจักรต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นอย่างมาก เมื่ออุปกรณ์ เครื่องมือ และเครื่องจักรต่าง ๆ มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นก็จะเป็นการประหยัดพลังงาน และเป็นการลดต้นทุนการผลิตไปได้ในตัวด้วย

โดยทั่วไปวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนความร้อนโดยการพาความร้อน (Heat Convection) มีด้วยกัน 2 วิธีหลัก ๆ คือ 1) วิธีที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วยในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Active Technique) คือ การเพิ่มการสั่นสะเทือนและเพิ่มความปั่นป่วนของของไหล โดยการนำอุปกรณ์ภายนอกเข้ามาช่วย เช่น อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้า เมื่อของไหลเกิดการสั่นสะเทือนและเกิดความปั่นป่วนก็จะสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ 2) วิธีที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วยในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Passive Technique) คือ การสร้างความปั่นป่วนให้กับของไหล โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสภายในท่อหรือทำการติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนภายในท่อ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มพื้นที่ผิวภายในท่อก็ทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในท่อด้วยเช่นกัน

วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Passive Technique เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมากที่สุด เนื่องจากต้นทุนในการผลิตต่ำและสามารถปรับเปลี่ยนได้หลายรูปแบบ การเลือกใช้ตัวสร้างความปั่นป่วน โดยการติดแผ่นกั้นการไหลรูปตัววงรีที่ผนังท่อก็เป็นหนึ่งในวิธีของ Passive Technique ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อน แต่ก็ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในท่อด้วย ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงการเลือกใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนให้เหมาะสม และมีประสิทธิภาพสูงสุด ในการเลือกตัวสร้างความปั่นป่วนภายในท่อที่เหมาะสมนั้นจะต้องพิจารณาถึงรูปทรง ขนาด มุมปะทะ ระยะห่างระหว่างตัวสร้างความปั่นป่วน และตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทาน เพื่อการศึกษาเกี่ยวกับค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้ได้ค่าที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงได้นำวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาใช้เพื่อเพิ่มความถูกต้องและความแม่นยำในการศึกษา

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติในท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี ซึ่งได้กำหนดให้ผนังท่อกับปลั๊กความร้อนคงที่ การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(FLUENT) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เป็นที่ยอมรับ และยังสามารถนำไปใช้กับกรณีอื่น ๆ ได้ด้วย วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหล และการถ่ายเทความร้อนโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี

1.2.2 เพื่อศึกษาหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ซึ่งประกอบด้วย เลขนัสเซลท์ ค่าตัวประกอบเสียดทาน และประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีในรูปแบบต่าง ๆ

1.2.3 พัฒนาและปรับปรุงแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีในรูปแบบต่าง ๆ

### 1.3 สมมติฐาน

1.3.1 สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการไหล และการถ่ายเทความร้อนจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี

1.3.2 ทราบถึงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงสุดภายในท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี

1.3.3 พัฒนาและปรับปรุงแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดียิ่ง ๆ ขึ้นไป

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ

1.4.2 ทำการศึกษาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method) โดยศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในรูปของเลขนัสเซลท์และค่าตัวประกอบเสียดทาน

1.4.3 ใช้คู่ควบของความเร็และความดันโดยใช้วิธีแบบ COUPLED

1.4.4 ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG  $k - \epsilon$

1.4.5 เทอมของการพาความร้อนใช้การคำนวณแบบ QUICK

1.4.6 พิจารณาเฉพาะความร้อนแบบบังคับ (Force Convection)

1.4.7 ศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนที่มีเลขเรย์โนลด์ในช่วง ตั้งแต่ 3,000 ถึง 15,000

1.4.8 มีการให้ความร้อนที่ผนังท่อแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่  $500 \text{ W/m}^2$

1.4.9 อัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นกั้นการไหลกับความยาวด้านของท่อ (Blockage Ratio, BR) เท่ากับ 0.05, 0.1 และ 0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.10 อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นการไหลกับความยาวด้านของท่อ (Pitch Ratio, PR) เท่ากับ 0.5, 1 และ 1.5

1.4.11 มุมปะทะ (Angle of Attack,  $\alpha$ ) เท่ากับ  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$

1.4.12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลมเท่ากับ 50 mm

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี

1.5.2 กำหนดรูปร่างและลักษณะของแผ่นกั้นการไหลโดยอ้างอิงรูปแบบพื้นฐานจากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา

1.5.3 ทำการตรวจสอบแบบจำลองที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับผลการทดลองของนักวิจัยในอดีตที่ผ่านมา

1.5.4 สร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบพลศาสตร์ของไหล และหาขนาดและจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสม

1.5.5 คำนวณเชิงตัวเลขจากการจำลองการไหลสามมิติ โดยเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสม ได้แก่ เลขเรย์โนลด์ (Re), อัตราส่วนพิทช์ (PR), อัตราส่วนบล็อกการไหล (BR) และ มุมปะทะ ( $\alpha$ )

1.5.6 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณโดยการเปรียบเทียบค่าที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนโดยการสร้างตาราง และกราฟเปรียบเทียบ

1.5.7 สรุปผลการวิจัย และให้ข้อเสนอแนะ

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

1.6.1 ได้เรียนรู้เกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งสร้างความเป็นป่วนภายในท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี

1.6.2 ได้ฝึกการใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

1.6.3 ได้เรียนรู้ถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี

1.6.4 เพื่อพัฒนาและออกแบบรูปแบบแผ่นกั้นรูปวงรี ให้มีความเหมาะสม และสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.6.5 เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อไป

1.6.6 เป็นการประหยัดพลังงานและนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กล่าวนำ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนของของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างมากในทางอุตสาหกรรมและเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่าง ๆ ทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องมีการนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีจึงมีความจำเป็น ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการ ทฤษฎี สมการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ

### 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

#### 2.2.1 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับของไหล

ของไหล (Fluid) คือของเหลวและก๊าซ ในการวิเคราะห์จะต่างกันตรงที่ก๊าซจะเป็นของไหลที่สามารถอัดตัวได้ส่วนของเหลวนั้นไม่สามารถอัดตัวได้ถึงแม้จะอัดตัวได้บ้าง แต่ต้องใช้ความดันสูงมาก จึงพิจารณาว่าของเหลวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้

ของไหลอัดตัวได้คือของไหลที่ความหนาแน่นไม่คงที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ก๊าซอยู่ในภาชนะปิดสนิทเมื่อได้รับความร้อน ความหนาแน่นของก๊าซก็จะเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามถ้าสูญเสียความร้อน ความหนาแน่นก็จะลดลง ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะของไหลที่อัดตัวไม่ได้เท่านั้น

- ความหนาแน่น (Density,  $\rho$ ) คือ มวล ( $m$ ) ของสารนั้นหารด้วยปริมาตร ( $V$ )
- ปริมาตรเฉพาะ (Specific Volume,  $v$ ) คือ ปริมาตรของสารนั้นหารด้วยมวล ซึ่งจะมีค่าเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น
- ความหนืด (Viscosity,  $\mu$ ) คือ คุณสมบัติการต้านการเคลื่อนที่ของของไหล
- น้ำหนักจำเพาะ (Specific Weight,  $\gamma$ ) คือ ความหนาแน่น คูณกับค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $g$ ) หรือน้ำหนัก ( $mg$ ) หารด้วยปริมาตร

#### 2.2.2 การไหลในท่อกลม

การไหลในท่อกลมที่บริเวณทางเข้าท่อที่แสดงในรูปที่ 2.5 นั้นจะเห็นว่าตั้งแต่ที่บริเวณทางเข้าชั้นขอบเขตของความเร็วยังคงพัฒนาเพิ่มขึ้นที่ละเล็กที่ละน้อยจนถึงระยะทางค่าหนึ่ง ( $L_e$ ) ชั้นของความเร็วยังคงกันทั้งบน และล่าง หลังจากนั้นการกระจายความเร็วจะไม่มีเปลี่ยนแปลง เรียกว่า

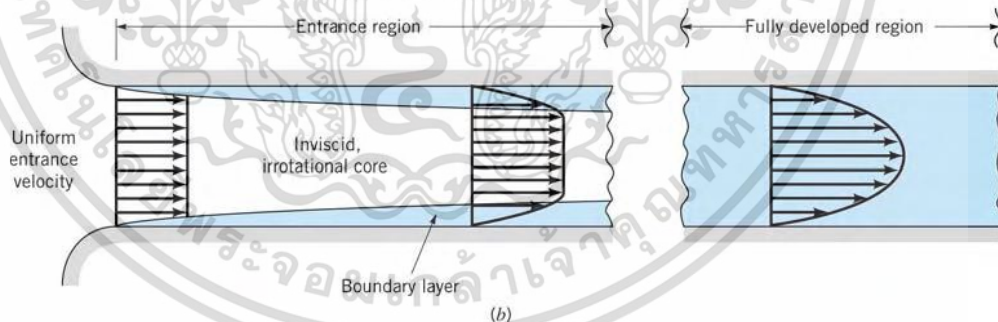
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์ (Fully Developed) ค่าเรย์โนลด์  $Re$  สำหรับการไหลภายในท่อนั้น ถ้าให้  $V$  เป็นค่าความเร็วเฉลี่ย  $D$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของพื้นที่ตัดขวางท่อแล้วจะได้

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (2.1)$$

อนึ่งค่า  $\rho V \left( \frac{kg}{m^2 \cdot s} \right)$  จะเป็นค่าการไหลของมวลสารต่อพื้นที่หน้าตัดในการไหล สำหรับในกรณีของก๊าซนั้น การเพิ่มความร้อนภายในท่อจะทำให้ก๊าซขยายตัวมีความเร็ว  $V$  เพิ่มขึ้น ค่า  $\rho V$  จะไม่เปลี่ยนแปลง ถ้าพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สะดวกในการคำนวณ นอกจากนั้นโดยปกติจะถือว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด  $\mu$  จะไม่เปลี่ยนแปลงไปกับความดันอีกด้วย ส่วนค่าความหนืดเชิงจลนศาสตร์  $\nu$  ซึ่งเท่ากับ  $\frac{\mu}{\rho}$  ในกรณีของก๊าซจะเป็นค่าที่ผกผันกับความดันซึ่งจะต้องระมัดระวัง

ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ  $Re_c$  ของการไหลภายในท่อที่ได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์แล้ว คือค่าเรย์โนลด์ ที่การไหลเปลี่ยนจากการไหลราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่า  $Re_c = 2300$  หรืออยู่ในช่วงระหว่าง  $2000 - 4000$  โดยประมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนในการไหล ความขรุขระภายในท่อที่ไหล หรือรูปทรง และสภาพของทางเข้า ส่วนค่าเรย์โนลด์ที่ต่ำกว่า  $2000$  ไม่ว่าท่อจะมีความยาวมากเพียงใด การไหลก็จะไม่เปลี่ยนแปลงไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน จะยังคงรักษาสภาพการไหลแบบเป็นชั้น หรือราบเรียบต่อไป



รูปที่ 2.1 การไหลภายในท่อกลม

### 2.2.3 การไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลม

รูปที่ 2.1 เป็นรูปที่แสดงให้เห็นว่า การกระจายความเร็วที่ได้พัฒนาอย่างสมบูรณ์แล้วจะเป็นรูปพาราโบลา ถ้าให้  $V$  เป็นความเร็วเฉลี่ยในการไหล และให้  $U_c$  เป็นความเร็วที่จุดศูนย์กลางของท่อ เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = \frac{\dot{M}}{\rho \left( \frac{\pi D^2}{4} \right)} = \frac{U_c}{2} \quad (2.2)$$

ในท่อที่มีความยาวเป็น  $L$  จะมีการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากการสูญเสียความดันคือ  $\frac{\Delta P}{\rho}$  [J/kg] ซึ่งจะมีค่า เท่ากับ

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{64}{Re} \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2} \quad (2.3)$$

ในที่นี้  $\frac{\Delta P}{\rho}$  จะเรียกว่า “ความดันที่สูญเสียไป”

#### 2.2.4 การไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลม ( $Re > 4000$ )

รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นการกระจายความเร็วที่ได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์การกระจายความเร็ว จะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความเร็วเฉลี่ยหาได้จาก

$$V = 0.82U_c \quad (2.4)$$

อนึ่งสำหรับการไหลภายในท่อที่ไม่ใช่ท่อกลมนั้นจะใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล)  $D_e$  ซึ่งหาได้จาก

$$D_e = \frac{4A}{L_p} \quad (2.5)$$

โดย  $A$  จะเป็นพื้นที่หน้าตัดในการไหล  $L_p$  จะเป็นความยาวเส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดของของไหลที่สัมผัสผนังของท่อ ในกรณีของท่อกลม  $D_e = D$

#### 2.2.5 ค่าตัวประกอบความเสียดทาน

ค่าตัวประกอบความเสียดทานของ Moody หรือ Darcy เป็นตัวแปรไร้มิติที่สามารถกำหนดได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$f_{Darcy} \equiv \frac{\left( \frac{\Delta p}{L} \right) D}{\rho u^2 / 2} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

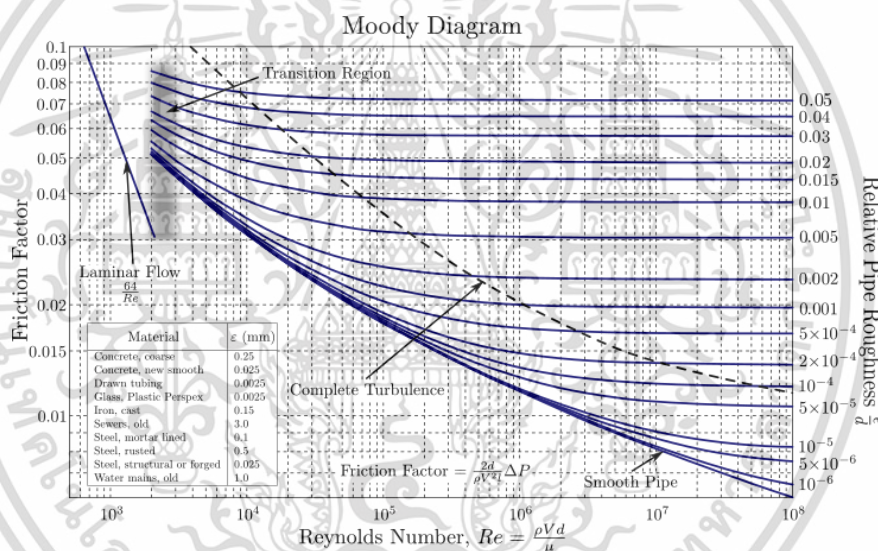
เมื่อ  $L$  คือ ความยาวของท่อที่วัดความดันตกคร่อมได้

สำหรับการไหลภายในท่อผิวเรียบ ที่ค่าเรย์โนลด์สูงๆ สามารถหาค่าตัวประกอบเสียดทานได้จากการพัฒนาของ Petukov ดังสมการต่อไปนี้

$$f = (0.79 \ln Re_D - 1.64)^{-2} \quad (2.7)$$

สำหรับค่าเรย์โนลด์ในช่วง  $3,000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$

แผนภาพของ Moody แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าตัวประกอบเสียดทานของ Darcy-Weisbach ค่าเรย์โนลด์ และค่าความขรุขระของพื้นผิว สำหรับช่วงการไหลที่ปรับตัวเต็มที่ภายในท่อ ซึ่งสามารถใช้ทำนายความดันตกคร่อมหรืออัตราการไหลในท่อได้



รูปที่ 2.2 แผนภาพของ Moody

## 2.2.6 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

### 2.2.6.1 วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน

วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน แบ่งออกได้เป็น

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

การนำความร้อน หมายถึง กระบวนการที่ความร้อนถ่ายเทโดยอาศัยการเคลื่อนไหวของอะตอมหรือโมเลกุลในของแข็งไปตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพาความร้อน หมายถึง กระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวหน้าของวัตถุกับของไหลก็เรียกว่าการพาความร้อน ในอุปกรณ์ความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม โดยมากการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุมักจะสำคัญกว่าการถ่ายเทความร้อนภายในตัวของไหลเอง ในที่นี้จึงจะกล่าวถึงการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าว การพาความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งจากการไหลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือความหนาแน่น) และการไหลที่เกิดขึ้นจากปั๊มหรือพัดลม เป็นต้น ซึ่งแบบแรกจะเรียกว่า การพาความร้อนตามธรรมชาติแบบหลังจะเรียกว่าการพาความร้อนด้วยการบังคับ

การแผ่รังสี วัตถุทุกชนิดจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาว และความเข้มค่าหนึ่งจากพื้นผิวอยู่ตลอดเวลาโดยความยาวและความเข้มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่าการแผ่รังสีความร้อน หากวัตถุอื่นดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ก็จะได้รับพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้เรียกว่าการแผ่รังสี

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน สามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการคงที่และกระบวนการไม่คงที่ กระบวนการคงที่หมายถึง ในการถ่ายเทความร้อน การกระจายอุณหภูมิภายในตัววัตถุและปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ส่วนในกระบวนการไม่คงที่ ปริมาณเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

### 2.2.6.2 สภาวะการถ่ายเทความร้อน

เมื่ออุณหภูมิของของไหลและท่อมี่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยที่ผิวท่อมี่อุณหภูมิสูงกว่าของไหล การพาความร้อนจะเกิดขึ้น เมื่อความร้อนที่ผิวของท่อมี่อุณหภูมิผิว ( $T_s$ ) คงที่ หรือฟลักซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) คงที่ สภาวะพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (Thermally fully developed condition) จะเกิดขึ้น

จากการทดลองการไหลแบบปั่นป่วน ค่า Pr จะไม่มีผลกับการพัฒนาชั้นขีดผิวเชิงความเร็ว และชั้นขีดผิวเชิงความร้อน ซึ่งประมาณได้ว่า  $L_{e,th} / D \approx 10$

ฟลักซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) สามารถหาได้จากกฎของนิวตัน ดังนี้

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $T_s$  คือ อุณหภูมิผิว  
 $T_m$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัด  
 $h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ฟลักซ์ความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างกันรวมทั้งหมดระหว่างผนังกับของไหล ซึ่ง

$h$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาบางครั้งเรียกว่าการนำผ่านฟิล์ม เพราะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบาง ๆ ของของไหลที่บริเวณผิวของผนัง ค่า  $T_m$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางของไหลนั้นคือ  $dT/dx$  จะไม่เป็นศูนย์ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ  $T_m$  จะเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหล  $x$  ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนจากผิวสู่ของไหล

### 2.2.6.3 สภาวะการพัฒนอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

สภาวะการพัฒนอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (Thermally Fully Developed) จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิรัมีติไม่มีการเปลี่ยนแปลง การพาความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างชั้นชิดผิวกับของไหล อุณหภูมิของของไหลจึงเปลี่ยนแปลงตามระยะ  $x$  เพื่อให้ได้ตามเงื่อนไขของการพัฒนาเชิงความร้อน กำหนดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิแบบรัมีติในรูป  $(T_s - T)/(T_s - T_m)$  อัตราส่วนนี้เป็นอิสระกับ  $x$  หมายความว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิรัมีตินี้จะไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกการไหลแบบนี้ว่าการไหลแบบพัฒนอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน และจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right] = 0 \quad (2.9)$$

เมื่อ  $T$  คือ อุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใด ๆ

เงื่อนไขที่กำหนดสำหรับสมการ (2.8) อาจจะเป็น  $q_s$  คงที่ หรือ  $T_s$  คงที่

### 2.2.6.4 การพาความร้อน

#### หลักการพื้นฐานของการพาความร้อน

การพาความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ การพาความร้อนเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติจากความแตกต่างของอุณหภูมิเรียกว่า การพาความร้อนโดยธรรมชาติ ส่วนการพาความร้อนที่เกิดจากความหนาแน่นของการไหลจากเครื่องส่งกำลังต่าง ๆ จะเรียกว่า การพาความร้อนโดยการบังคับ ในที่นี้จะกล่าวถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวของวัตถุ

### ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน

เมื่อของไหลมีอุณหภูมิแตกต่างกันกับท่อที่มีอุณหภูมิที่ผิวสูงกว่า การพาความร้อนจะเกิดขึ้น เมื่อความร้อนที่ผิวของท่อเป็นอุณหภูมิผิว ( $T_s$ ) คงที่ หรือฟลักซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) คงที่ สภาวะพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (Thermally fully developed condition) จะเกิดขึ้น

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (2.10)$$

เมื่อ	$T_s$	คือ อุณหภูมิผิว
	$T_m$	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัด
	$h$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

### ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

การถ่ายเทความร้อนในของไหลขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น รูปร่างของวัตถุ ประเภทของของไหล อย่างไรก็ตามเราสามารถหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในรูปของปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ความเร็วกระแสหลัก ( $u$ ) ระยะทาง ( $D$ ) สัมประสิทธิ์ความหนืดของของไหล ( $\mu$ ) ความหนาแน่น ( $\rho$ ) ความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) สามารถอธิบายด้วยฟังก์ชันปริมาณต่าง ๆ ต่อไปนี้

$$\left( \frac{hD}{k} \right) = f \left\{ \left( \frac{uD}{\mu/\rho} \right), \left( \frac{C_p\mu}{k} \right) \right\} \quad (2.11)$$

จากทั้ง 3 พจน์ในสมการ (2.11) ขึ้นอยู่กับปริมาณทางฟิสิกส์หลายตัว ดังนี้

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2.12)$$

$$Re = \frac{uD}{\mu/\rho} = \frac{uD}{\nu} \quad (2.13)$$

$$Pr = \frac{C_p\mu}{k} = \frac{u/\rho}{k/C_p\mu} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $\nu$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2.15)$$

กล่าวคือ Nu สามารถแสดงด้วยฟังก์ชันของ Re กับ Pr

### ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

ค่าตัวประกอบการเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของผิวที่ทดสอบ ( $h$ ) กับ ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของผิวเรียบ ( $h_0$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.15 และ 2.16

$$TEF = \frac{h}{h_0} \Big|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \Big|_{pp} = \left( \frac{Nu}{Nu_0} \right) \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (2.16)$$

$$TEF = \frac{(Nu / Nu_0)}{(f / f_0)^{1/3}} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $Nu$  คือ เลขนัสเซิลท์  
 $Nu_0$  คือ เลขนัสเซิลท์ของท่อผิวเรียบ  
 $f$  คือ ค่าตัวประกอบเสียดทาน  
 $f_0$  คือ ค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ

### 2.3 การคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง

สำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อน การลดภาระและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ นอกจากนี้ยังมีความแม่นยำ และความถูกต้องในการคำนวณ โดยใช้วิธีการคำนวณแบบซ้ำเป็นช่วง (Periodic Flow) เข้ามาช่วย ซึ่งการวิเคราะห์การไหลลักษณะนี้จะใช้เป็นแบบรูปทรงเลขาคณิต การคำนวณแบบไหลซ้ำเป็นช่วงนี้สามารถแบ่งได้เป็นการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว และการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน มีรายละเอียดดังนี้

### 2.3.1 การไหลเข้าเป็นช่วงเชิงความเร็ว

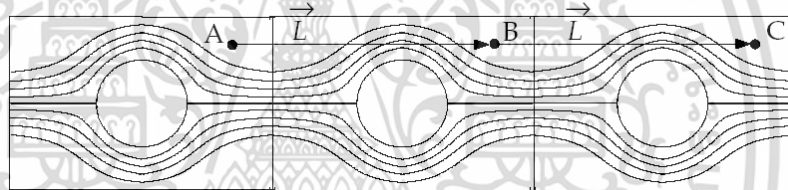
การไหลเข้าเป็นช่วงเชิงความเร็วเป็นลักษณะการไหลเมื่อมีค่าความดันตกคร่อมเกิดขึ้นข้ามขอบเขตการไหลไปในทิศทางที่พัฒนาสมบูรณ์แล้ว สภาวะการไหลเข้าเป็นช่วงนี้จะเกิดขึ้นหลังจากมีช่วงความยาวทางเข้าที่เพียงพอ

#### 2.3.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลเข้าเป็นช่วง

เมื่อรูปแบบการไหลเกิดขึ้นในช่วงการไหล  $L$  โดยมีค่าความดันตกคร่อมคงที่ในช่วงโมดูลนั้น ๆ ตามทิศทางไหล นิยามของการไหลเข้าเป็นช่วงเชิงความเร็วโดยค่าความเร็วย่อยจะซ้ำกันในตัวมันเอง ดังสมการที่ 2.18 และรูปที่ 2.3

$$u_i(\vec{r}) = u_i(\vec{r} + \vec{L}) = u_i(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \quad i=1, 2, 3 \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\vec{r}$  คือ เวกเตอร์บอกตำแหน่ง  
 $\vec{L}$  คือ เวกเตอร์ความยาวที่ซ้ำเป็นช่วงของขอบเขตการไหล



รูปที่ 2.3 แสดงรูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง

จากรูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ได้ว่า

$$u_A = u_B = u_C \quad (2.19)$$

$$v_A = v_B = v_C \quad (2.20)$$

$$p_A = p_B = p_C \quad (2.21)$$

$$p_B - p_A = p_C - p_B \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

สำหรับการไหลแบบมีความหนืดร่วมด้วยนั้น ค่าความดันตกคร่อมในช่วงการไหลหรือโมดูลนั้น ๆ จะมีค่าเท่ากัน แสดงดังสมการ 2.23

$$\Delta p = p(\bar{r}) - p(\bar{r} + \bar{L}) = p(\bar{r} + \bar{L}) - p(\bar{r} + 2\bar{L}) = \dots \quad (2.23)$$

ค่าเกรเดียนต์ของความดันเฉพาะ สามารถแยกได้เป็นสองส่วน คือส่วนเกรเดียนต์ที่ซ้ำเป็นช่วง และส่วนเกรเดียนต์ความเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น โดยแสดงได้ดังสมการ 2.24

$$\bar{\nabla} p(\bar{r}) = \beta \frac{\bar{L}}{|\bar{L}|} + \bar{\nabla} p(\bar{r}) \quad (2.24)$$

เมื่อ  $p(\bar{r})$  คือ ความดันที่ซ้ำกันเป็นช่วง  
 $\beta|\bar{r}|$  คือ ส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดัน

### 2.3.2 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน

นิยามการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อให้ความร้อนที่ผนังท่อมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างขอบเขตของการซ้ำเป็นช่วงจะมีค่าคงที่ เมื่อมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นแบบซ้ำเป็นช่วง จะอธิบายได้ดังสมการนี้

$$\frac{T(\bar{r} + \bar{L}) - T(\bar{r})}{\bar{L}} = \frac{T(\bar{r} + 2\bar{L}) - T(\bar{r} + \bar{L})}{\bar{L}} = \sigma \quad (2.25)$$

$$\sigma = \frac{Q}{mc_p L} = \frac{T_{bulk,exit} - T_{bulk,inlet}}{L} \quad (2.26)$$

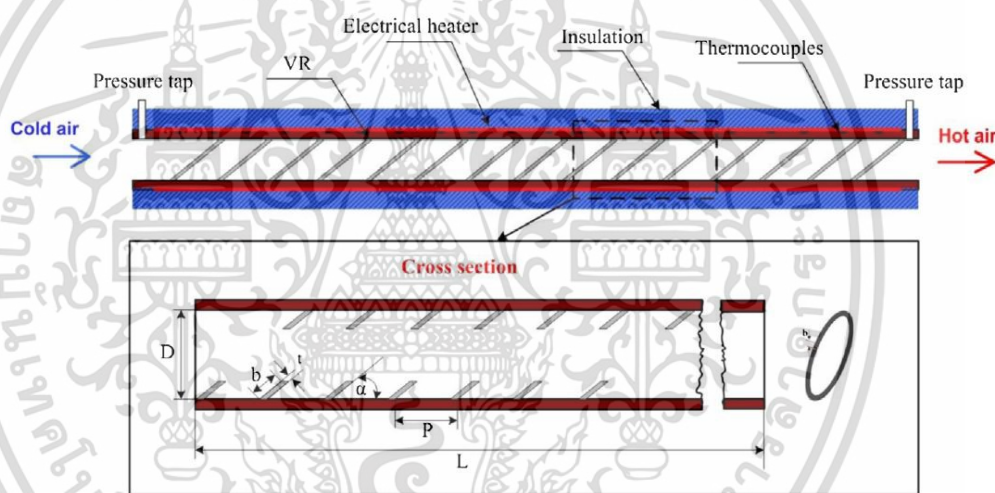
$$T_{bulk} = \frac{\int_A T |\rho \bar{u} \cdot d\bar{A}|}{\int_A |\rho \bar{u} \cdot d\bar{A}|} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ  
 $m$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลที่กำหนดให้  
 $T_{bulk}$  คือ อินทิเกรตตลอดพื้นที่หน้าตัดของโดเมนการไหลที่ซ้ำเป็นช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

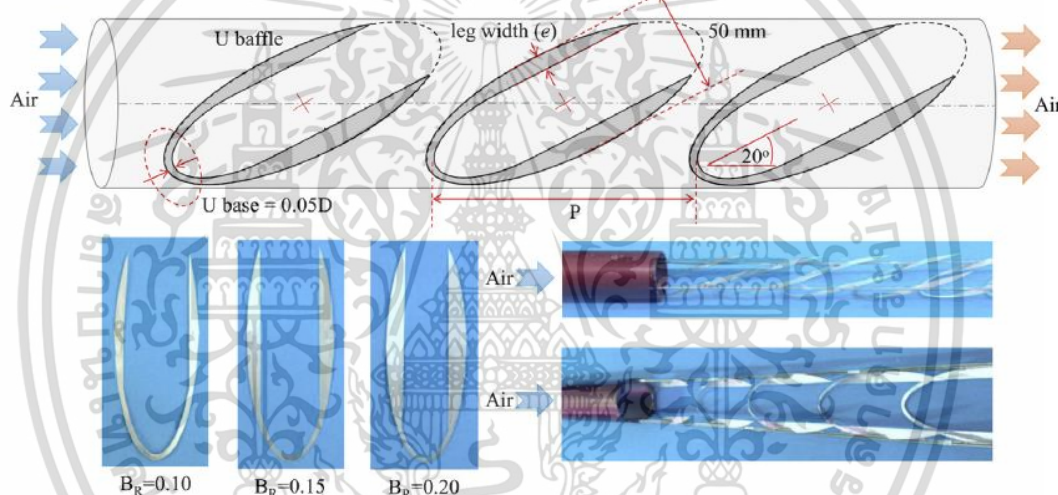
2.4.1 Pongjet Promvong et al. (2013) งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ท่อกลมที่ผนังท่อมีฟลักซ์ความร้อนคงที่มาทำการติดตั้งแหวนกั้นการไหลที่เอียงทำมุม  $30^\circ$  เพื่อทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนในท่อ ซึ่งจะส่งผลให้การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังมากขึ้น กำหนดอัตราส่วนบล็อกการไหล (Blockage Ratio, BR) เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 อัตราส่วนพิตช์ (Pitch Ratio, PR) เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ และศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5,000 ถึง 26,000 จากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนบล็อกการไหล (Blockage Ratio, BR) เพิ่มขึ้นการแลกเปลี่ยนความร้อนและค่าความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนพิตช์ (Pitch Ratio, PR) เพิ่มขึ้นการแลกเปลี่ยนความร้อนและค่าความดันตกคร่อมจะลดลง อย่างไรก็ตามอัตราส่วนบล็อกการไหล (Blockage Ratio, BR) 0.1 และอัตราส่วนพิตช์ (Pitch Ratio, PR) 0.5 ให้ผลลัพธ์ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.4 ท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนกั้นการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

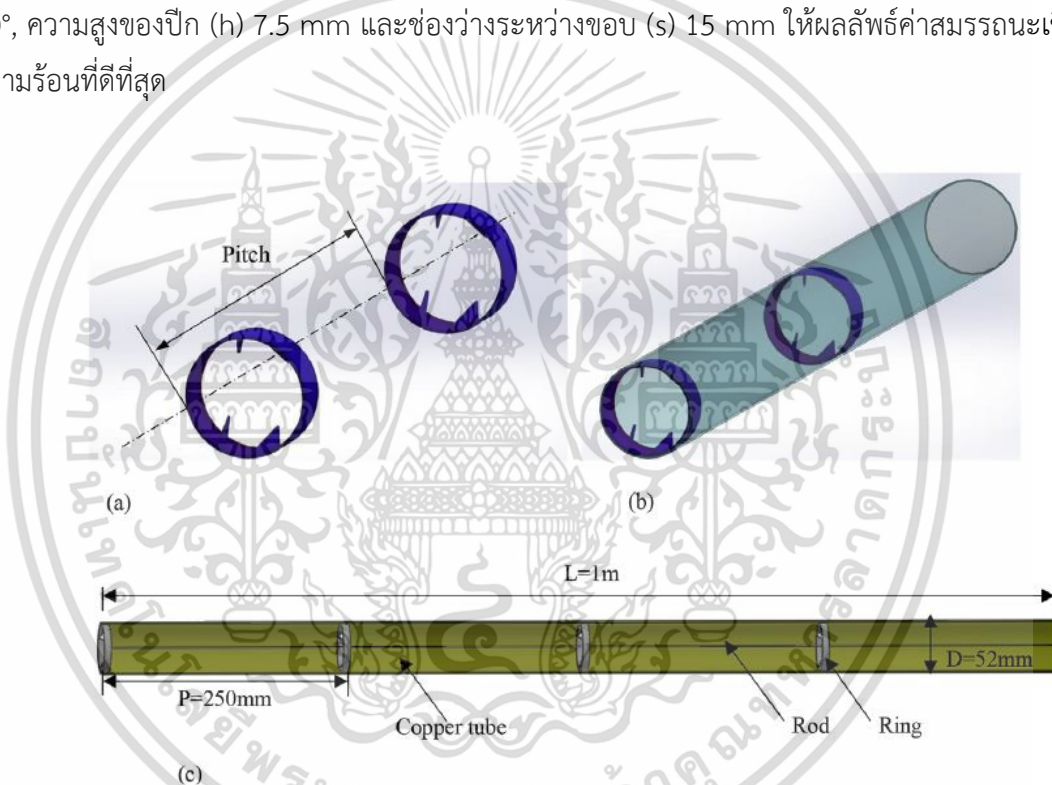
**2.4.2 Pongjet Promvong et al. (2014)** งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ท่อกลมที่ผนังท่อมีฟลักซ์ความร้อนคงที่มาทำการติดแผ่นกั้นการไหลรูปเกือกม้าที่เอียงทำมุม  $20^\circ$  เพื่อทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนในท่อ ซึ่งจะส่งผลให้การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังมากขึ้น กำหนดอัตราส่วนบล็อกรการไหล (Blockage Ratio, BR) เท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 อัตราส่วนพิตช์ (Pitch Ratio, PR) เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ และศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5,300 ถึง 26,000 จากการทดลองพบว่าท่อที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลมีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงกว่าท่อเปล่า 92 – 208% ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น 1.76 - 6.37 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น 1.34 - 1.92 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนบล็อกรการไหล (Blockage Ratio, BR) 0.1 และอัตราส่วนพิตช์ (Pitch Ratio, PR) 0.5 ให้ผลลัพธ์ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.5 ท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปเกือกม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 C. Zhai et al. (2018) งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ท่อกลมที่ผนังท่อมีลักษณะความร้อนคงที่มาทำการติดปีกกั้นการไหลสามเหลี่ยมคู่ทั้งด้านบนและด้านล่างของท่อ เพื่อทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนในท่อ ซึ่งจะส่งผลให้การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลกับผนังมากขึ้น กำหนดอัตราส่วนพิทช์ (Pitch Ratio, PR) เท่ากับ 9.6 องศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  และ  $40^\circ$  ความสูงของปีก (h) เท่ากับ 5 mm, 7.5 mm และ 10 mm ช่องว่างระหว่างขอบ (s) เท่ากับ 10 mm, 15 mm และ 20 mm โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ และศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5,000 ถึง 25,000 จากการทดลองพบว่าเมื่อองศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ ) และความสูงของปีก (h) เพิ่มขึ้น เลขนัสเซิลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานก็จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ช่องว่างระหว่างขอบ (s) จะให้ เลขนัสเซิลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานสูงสุดที่ค่ากลาง ๆ อย่างไรก็ตาม องศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ )  $30^\circ$ , ความสูงของปีก (h) 7.5 mm และช่องว่างระหว่างขอบ (s) 15 mm ให้ผลลัพธ์ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.6 ท่อกลมที่มีการติดปีกกั้นการไหลสามเหลี่ยมคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### แบบจำลองและขั้นตอนการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบแบบจำลอง และขั้นตอนการศึกษา โดยจะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ของแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี ซึ่งจะคำนึงถึงค่าการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเป็นหลัก การหาค่าเหมาะสมของแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีได้กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์หลัก ดังนี้ อัตราส่วนบล็อกการไหล (BR), อัตราส่วนพิทซ์ (PR), องศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ )

#### 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อน ประกอบด้วยเลขนัสเซลท์(Nu), ค่าประกอบเสียดทาน (f), ค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) และเลขเรย์โนลด์ (Re) ที่อยู่ในสภาวะการไหลแบบคงตัว (Steady State) ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้สมการดังต่อไปนี้

เลขนัสเซลท์เฉลี่ยของท่อเปล่า (Empty Tube Average Nusselt Number)

$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (3.1)$$

เมื่อ  $Pr = 0.7$  และ  $n = 0.4$

เลขนัสเซลท์เฉลี่ย (Average Nusselt Number)

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_s dA \quad (3.2)$$

ค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่า (Empty Tube Friction Factor)

$$f = \frac{0.3160}{Re^{1/4}} \quad (3.3)$$

ค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction Factor)

$$f = \frac{(\Delta p) D}{0.5 \rho L u_0^2} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\Delta p$  คือ ค่าความดันตกคร่อม และ  $L$  คือ ความยาวช่วงหนึ่งของการไหล

ค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Enhancement Factor)

$$TEF = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \bigg|_{pp} = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (3.5)$$

เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)

$$Re = \frac{\rho u_0 D}{\mu} \quad (3.6)$$

อัตราการไหล (Mass Flow Rate)

$$\dot{m} = \rho u_0 A \quad (3.7)$$

เมื่อ  $u_0$  คือ ความเร็วของของไหลภายในท่อ

จากสมการข้างต้น ทำให้สามารถนำผลมาวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ ที่เหมาะสมของวงแหวนรูปวงรีได้ โดยหลักการวิเคราะห์คือ ค่าเลขนัสเซลท์หรือค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต้องมีค่าสูง ค่าตัวประกอบเสียดทานต้องมีค่าต่ำ และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนต้องมีค่าสูง ซึ่งค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะเป็นตัวชี้วัดสุดท้ายว่าแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีนั้น ๆ เหมาะสมกับการใช้งานหรือไม่

### 3.2 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณ

สำหรับการคำนวณการไหลใน 3 มิติ ขอบเขตที่ใช้มีเงื่อนไขดังนี้

1. ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ
2. ใช้การคำนวณแบบปริมาตรสี่เหลี่ยมและ วิธีการแบบ COUPLED
3. คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า
4. ทำการศึกษาเรย์โนลด์ในช่วง 4,000 ถึง 15,000
5. กำหนดให้ผนังของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่  $500 \text{ W/m}^2$
6. อัตราส่วนบล็อกการไหลเท่ากับ 0.05, 0.10 และ 0.15
7. อัตราส่วนพิตช์เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5
8. มุมของการปะทะเท่ากับ  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$

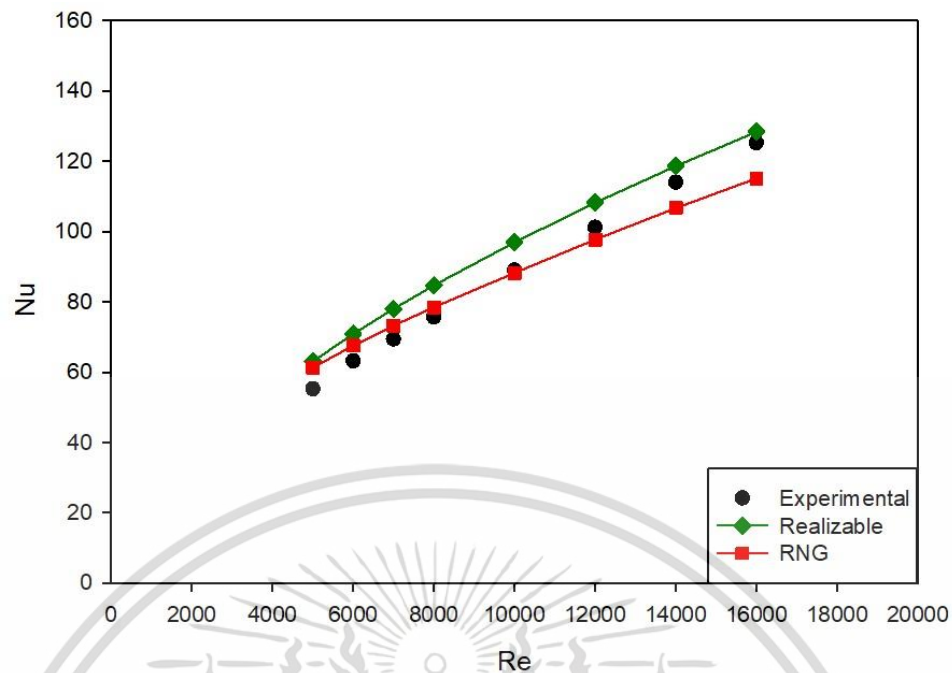
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการดำเนินการศึกษา

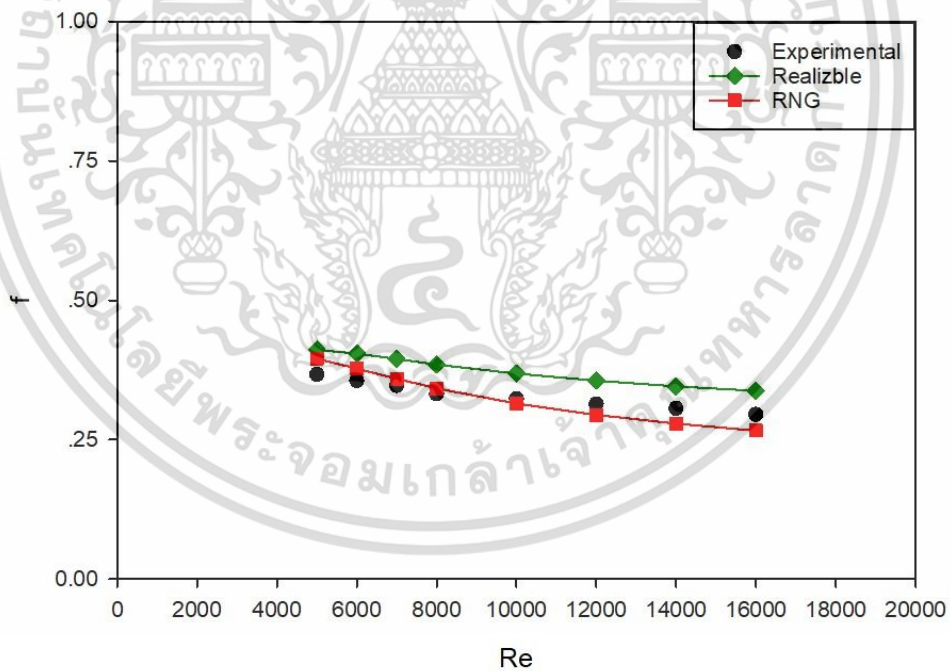
1. ศึกษาทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี
2. กำหนดรูปร่างและลักษณะของแผ่นกั้นการไหลโดยอ้างอิงรูปแบบพื้นฐานจากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา
3. ทำการตรวจสอบแบบจำลองที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับผลการทดลองของนักวิจัยในอดีตที่ผ่านมา
4. สร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบพลศาสตร์ของไหล และหาขนาดและจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสม
5. คำนวณเชิงตัวเลขจากการจำลองการไหลสามมิติ โดยเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสม ได้แก่ เลขเรย์โนลด์ (Re), อัตราส่วนพิตช์ (PR), อัตราส่วนบล็อกการไหล (BR) และ มุมปะทะ ( $\alpha$ )
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณโดยการเปรียบเทียบค่าที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนโดยการสร้างตาราง และกราฟเปรียบเทียบ
7. สรุปผลการวิจัย และให้ข้อเสนอแนะ

### 3.4 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข

เพื่อที่จะทำให้แน่ใจว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีความถูกต้อง จะต้องทำการทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validate) เสียก่อน โดยเลือกเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตของ Pongjet Promvong et al. (2013) เรื่อง Thermal Performance Enhancement in a Heat Exchanger Tube Fitted with Inclined Vortex Rings โดยใช้ท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี ที่มีอัตราส่วนบล็อกการไหล (Blockage Ratio, BR) = 0.10, อัตราส่วนพิตช์ (Pitch Ratio, PR) = 0.5, องศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ ) =  $30^\circ$  และความหนา (t) = 1.5 mm เปรียบเทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน  $k - \epsilon$  รูปแบบต่าง ๆ ได้ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูป 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 ค่าของเลขนัสเซิลท์จากแบบจำลองปั่นป่วน  $k - \epsilon$  เทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 3.2 ค่าของตัวประกอบเสียดทานจากแบบจำลองปั่นป่วน  $k - \epsilon$  เทียบกับผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและจากผลการทดลอง พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG  $k - \epsilon$  ให้ผลของเลขนัสเซลล์ท์และค่าตัวประกอบเสียดทานใกล้เคียงกับผลการทดลองที่สุด โดยค่าความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซลล์ท์และค่าตัวประกอบเสียดทานที่  $Re = 10,000$  เมื่อเทียบกับผลการทดลองอยู่ที่ 0.88% และ 4.47% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ดังนั้นแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้จึงเหมาะสมกับการนำไปทดลองต่อไป

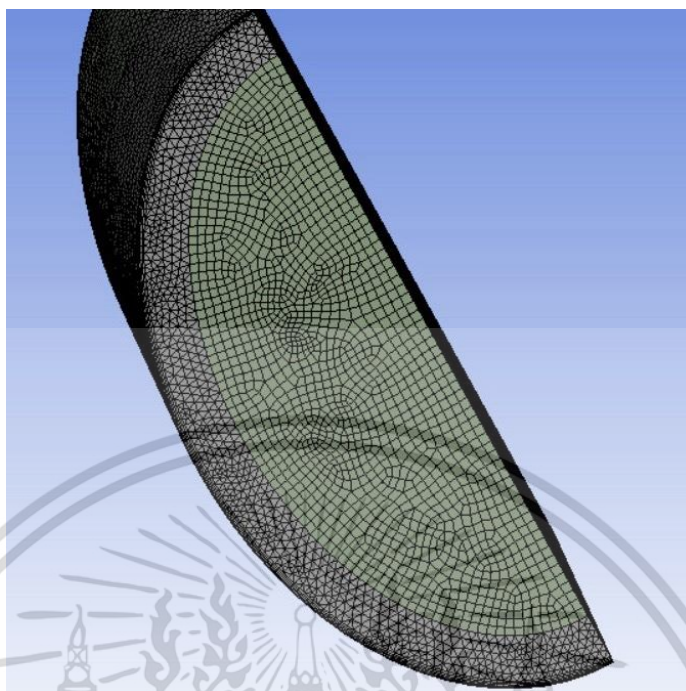
### 3.5 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้ใช้รูปแบบการแบ่งกริดเซลล์แบบไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniform Fine Grid) โดยพิจารณาบริเวณกริดเซลล์ที่ติดผนังให้มีจำนวนกริดเซลล์ที่หนาแน่น และบริเวณที่ห่างจากผนังมีจำนวนกริดเซลล์ที่เบาบางลง การตรวจสอบจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมนั้นสามารถทำได้ด้วยการเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ท์และค่าความดันตกคร่อมที่คำนวณผลมาจากจำนวนกริดเซลล์โดยประมาณที่ต่างกันทั้งหมด 5 ช่วง ได้แก่ 400,000, 200,000, 100,000, 50,000, 25,000 โดยค่าอัตราส่วนบล็อกการไหล (BR) เท่ากับ 0.1 ค่าอัตราส่วนพิตช์ (PR) เท่ากับ 1 ค่ามุมของการปะทะ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $45^\circ$  และมีเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) เท่ากับ 10,000 พิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของค่าเลขนัสเซลล์ท์และค่าความดันตกคร่อม ซึ่งทั้งสองค่าต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1% จากผลการทดสอบ จำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมสำหรับอัตราส่วนพิตช์ (PR) 0.5 คือ 50,000 จำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมสำหรับอัตราส่วนพิตช์ (PR) 1.0 คือ 100,000 จำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมสำหรับอัตราส่วนพิตช์ (PR) 1.5 คือ 200,000 และไม่จำเป็นต้องใช้จำนวนกริดเซลล์มากกว่านี้ เพื่อเป็นการลดภาระของโปรแกรม

**ตารางที่ 3.1** ตารางแสดงจำนวนกริดเซลล์ เลขนัสเซลล์ท์ เปอร์เซ็นต์ความคลาดของเลขนัสเซลล์ท์ ความดันตกคร่อม และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความดันตกคร่อม ที่อัตราส่วนพิตช์ (PR) 1.0

PR	Grid Cells	Nu	% Error	$\Delta p$	% Error
1.0	397,353	87.30565	0.31358	-55.35057	0.21367
	218,230	87.57942	0.42735	-55.46884	0.39799
	106,694	87.95369		-55.68960	0.68693
	51,902	89.58494	1.85467	-56.68960	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 รูปร่างกริดเซลล์ของหมวกกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

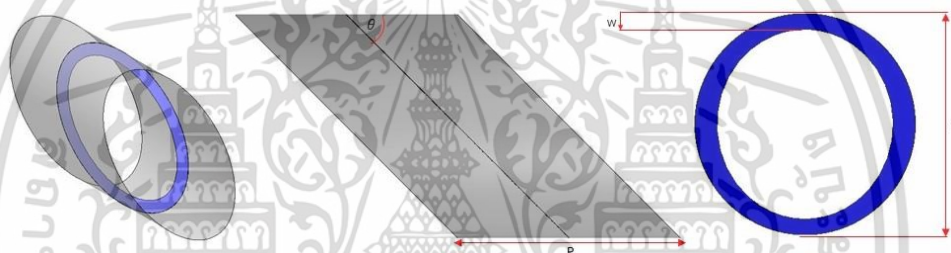
### 3.6 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน

#### 3.6.1 แผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน

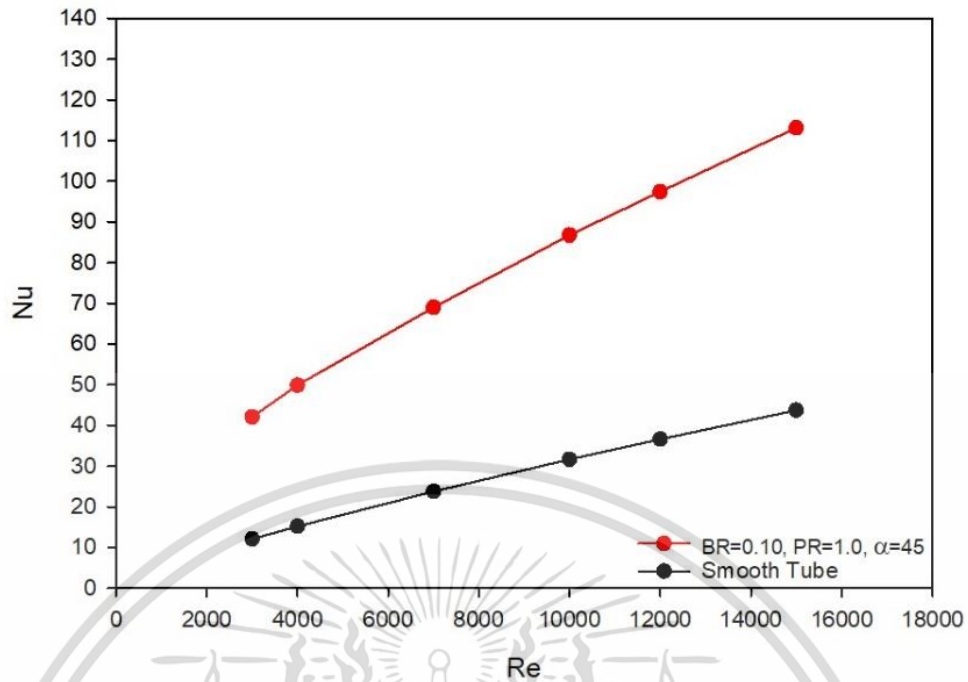
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้เริ่มต้นจากการศึกษาแผ่นกั้นรูปวงรีแบบพื้นฐาน โดยกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อกการไหล ( $BR, w/D$ ) = 0.10
2. อัตราส่วนส่วนพิทช์ ( $PR, p/D$ ) = 1.0
3. องศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ ) =  $45^\circ$
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลม ( $D$ ) = 0.05 m

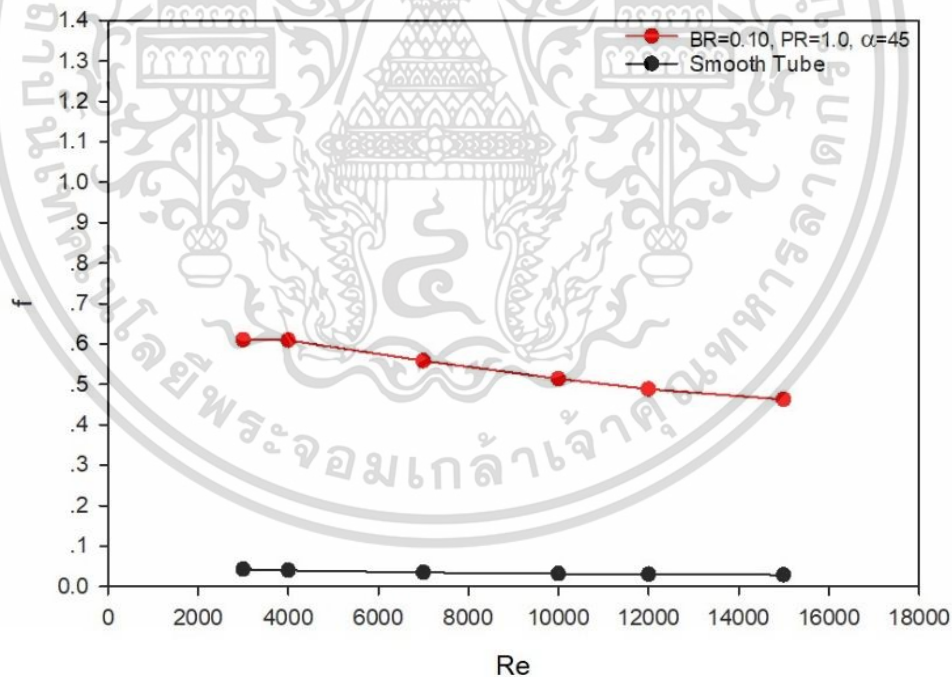
โดย  $w$  คือ ความกว้างของแผ่นกั้นการไหล,  $p$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นการไหลรูปตัววงรี เมื่อนำแผ่นกั้นการไหลรูปตัววงรีพื้นฐานติดตั้งภายในท่อกลมจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีแบบพื้นฐานที่  $BR = 0.10, PR = 1.0, \alpha = 45^\circ$

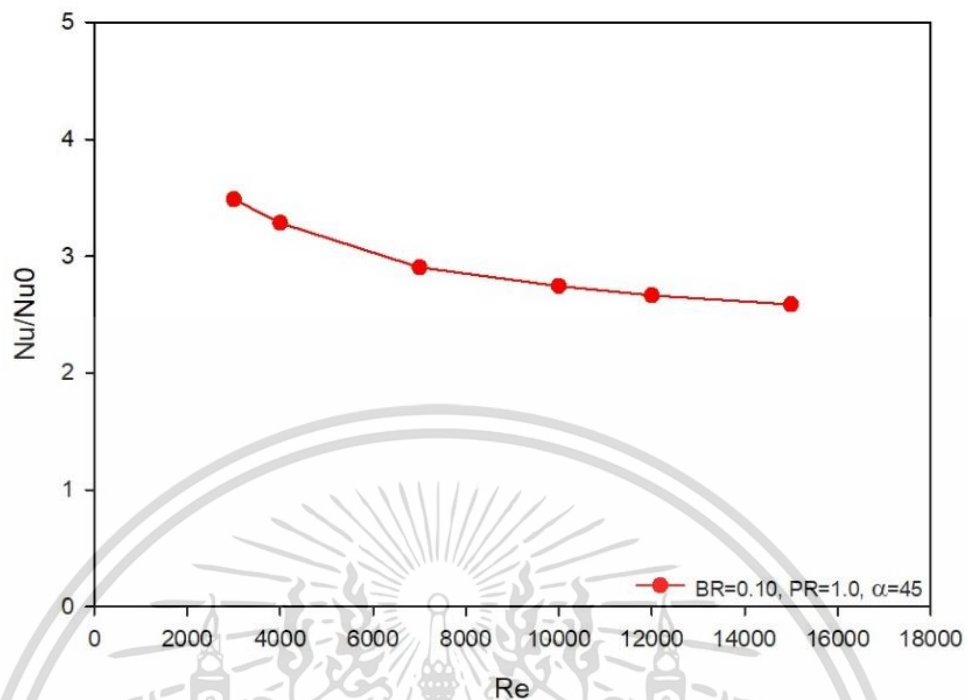


รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐานที่  $BR = 0.10$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 45^\circ$

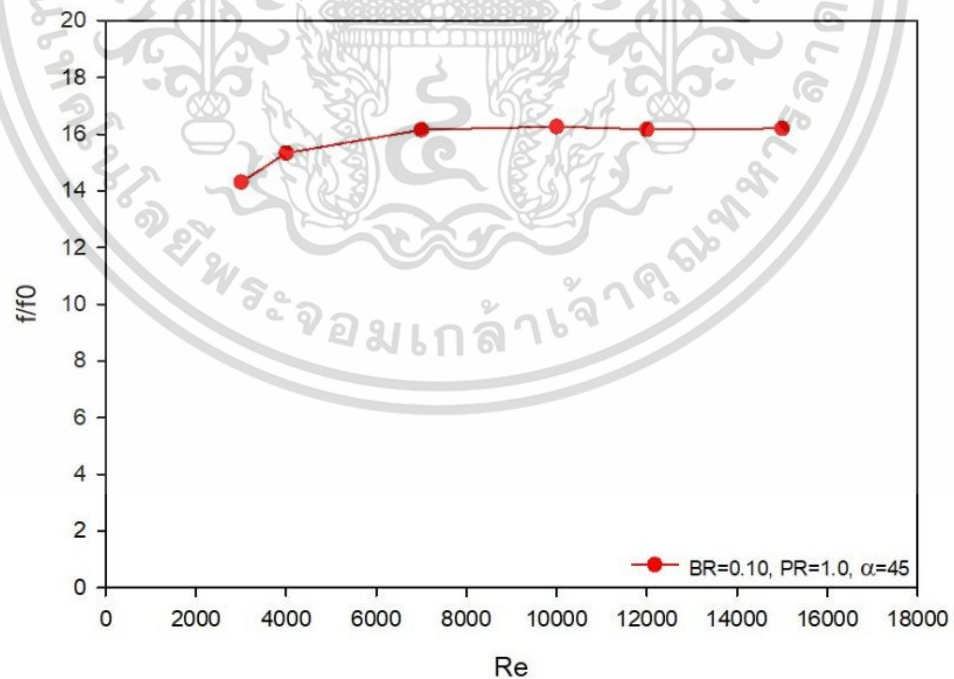


รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐานที่  $BR = 0.10$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

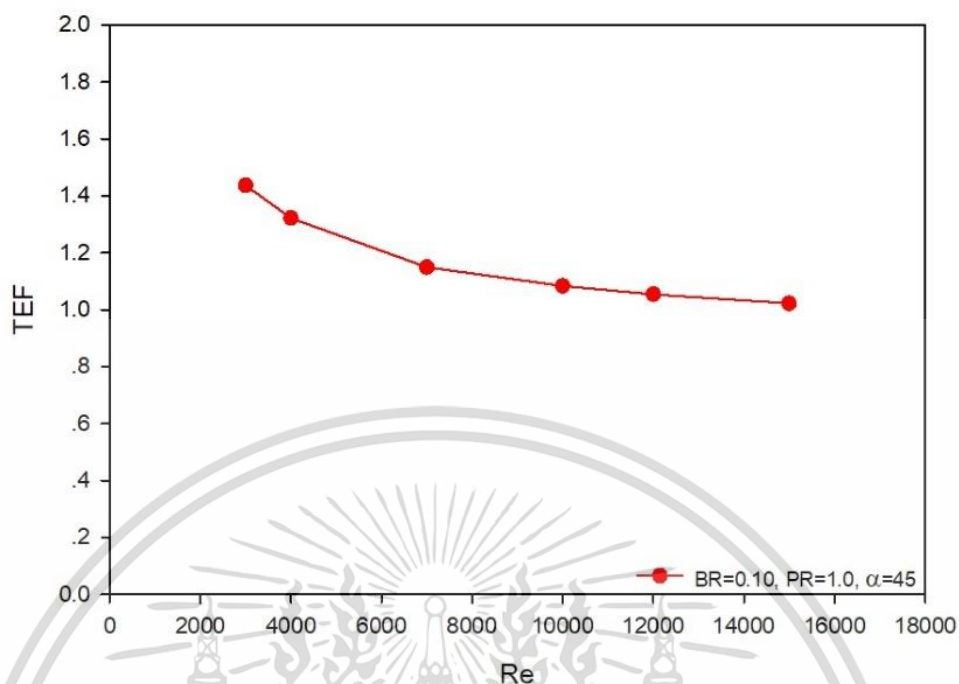


รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐานที่  $BR = 0.10$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 45^\circ$



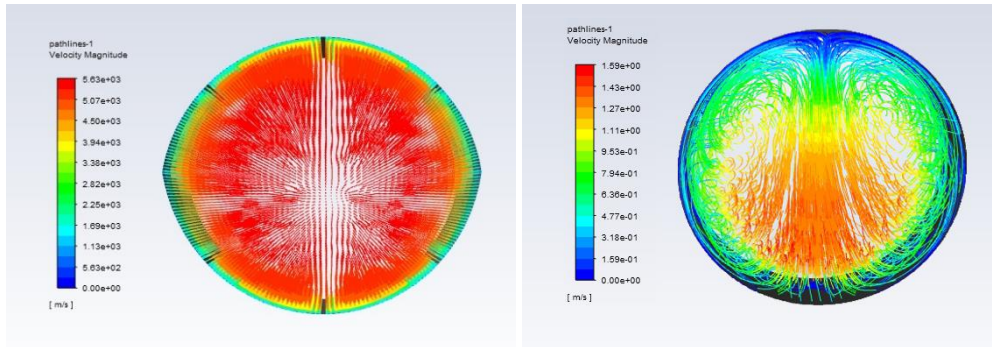
รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐานที่  $BR = 0.10$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

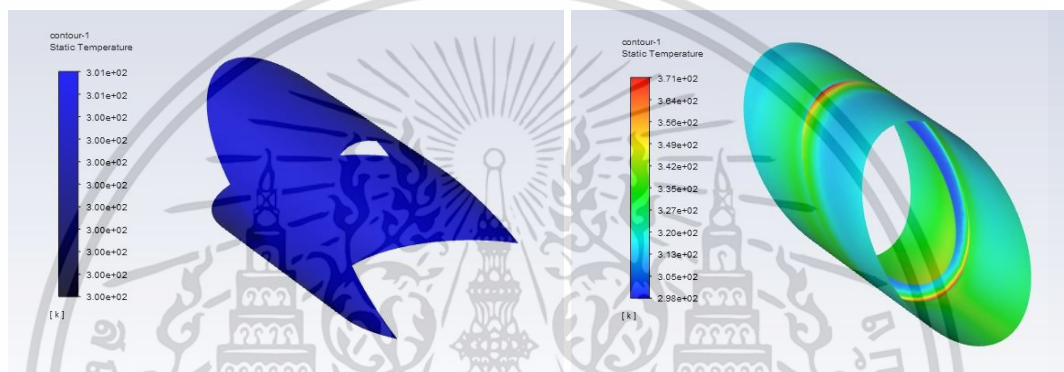


รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐานที่  $BR = 0.10$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 45^\circ$

จากการศึกษาแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน พบว่าเมื่อติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีภายในท่อกลม สามารถทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบปั่นป่วนและทำลายชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal Boundary Layer) ได้ จึงส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลกับผนังท่อกลมมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ อย่างไรก็ตามการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นมาก แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนยังไม่ได้ค่าที่ดีพอ ดังนั้นจึงต้องศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ ของแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีเพิ่มเติม เพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทาน และเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งรายละเอียดอยู่ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติของท่อกลมที่ไม่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี และท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน



รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิบนท่อกลมที่ไม่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี และท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2 อิทธิพลของความกว้างของแผ่นกั้นการไหล

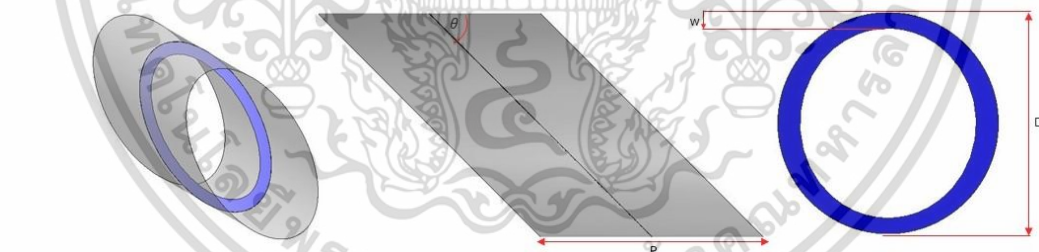
การศึกษาอิทธิพลของความกว้างของแผ่นกั้นการไหล ในรูปของอัตราส่วนบล็อกการไหล มีจุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมให้มีค่าลดลงจากแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน โดยปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนบล็อกการไหล (Blockage Ratio, BR) จาก  $PR = 1$ ,  $BR = 0.1$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ซึ่งการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อกการไหล ( $BR, w/D$ ) = 0.05, 0.10, 0.15
2. อัตราส่วนพิตช์ ( $PR, p/D$ ) = 1.0
3. องศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ ) =  $45^\circ$
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลม ( $D$ ) = 0.05 m

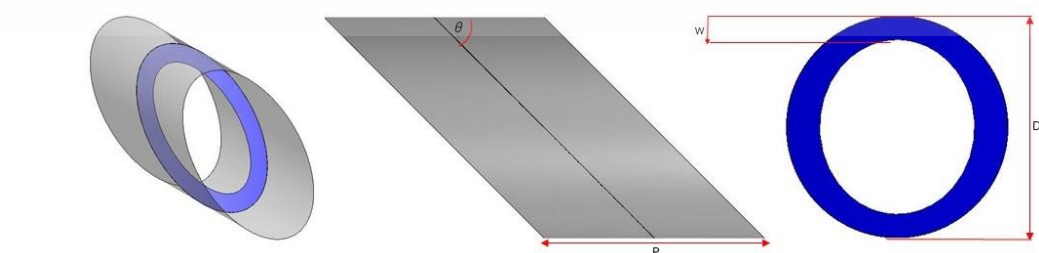
โดย  $w$  คือ ความกว้างของแผ่นกั้นการไหล,  $p$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นการไหลรูปตัววงรี การปรับค่าอัตราส่วนบล็อกการไหล สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 รูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.12 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า  $PR = 1.0, BR = 0.05, \alpha = 45^\circ$

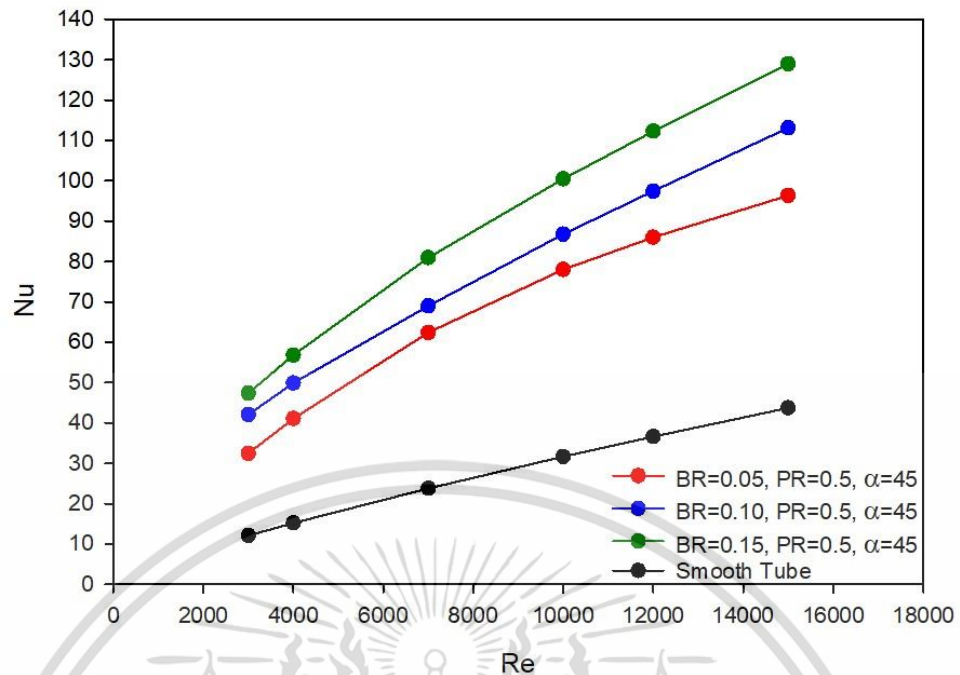


รูปที่ 3.13 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า  $PR = 1.0, BR = 0.10, \alpha = 45^\circ$

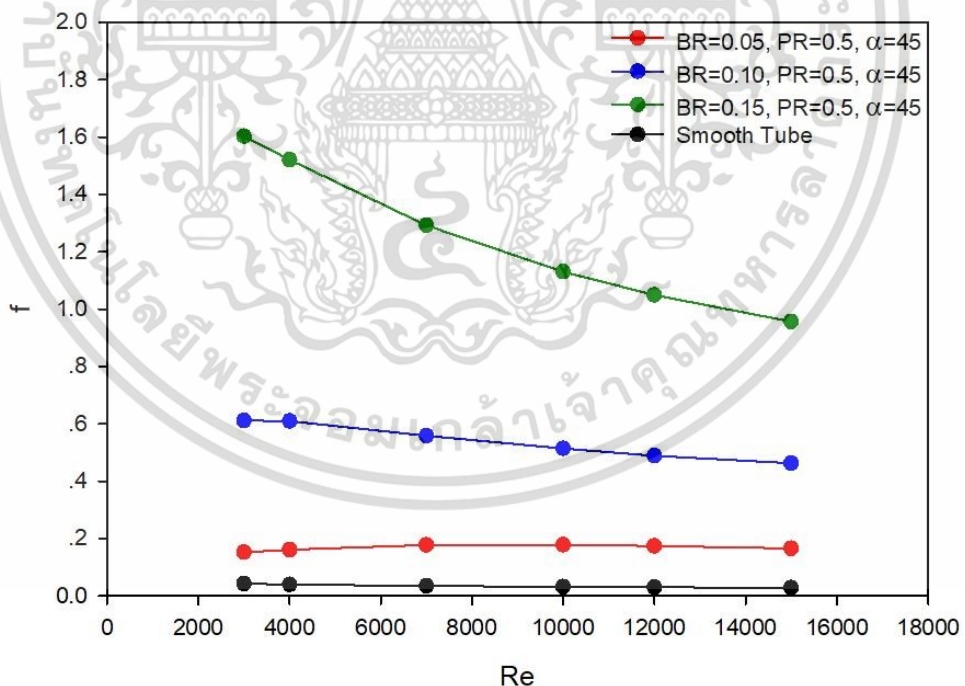


รูปที่ 3.14 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า  $PR = 1.0, BR = 0.15, \alpha = 45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

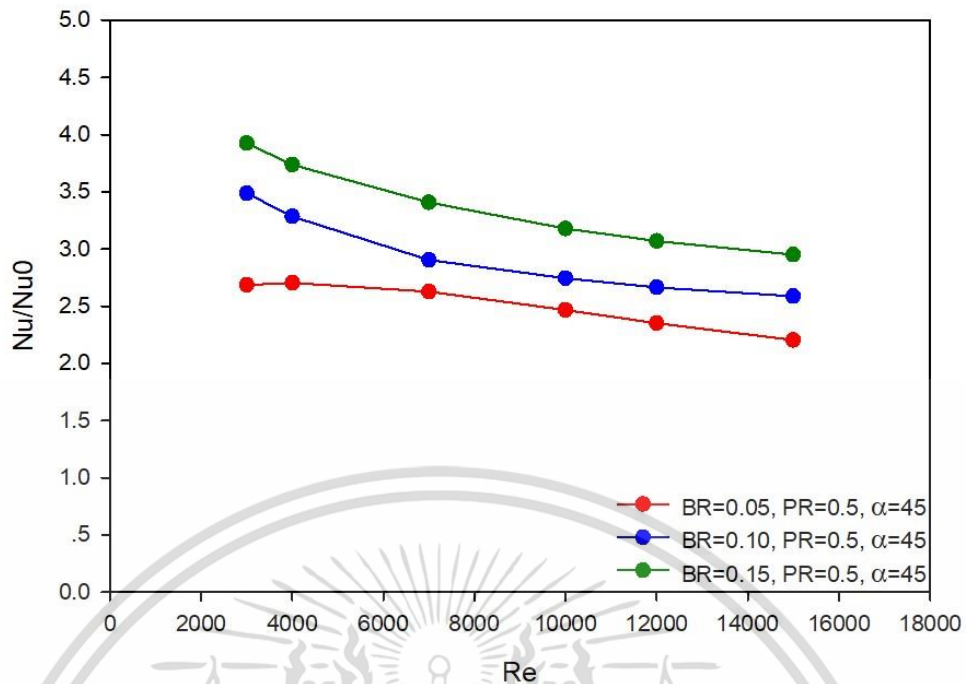


รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ระหว่าง  $BR = 0.05$ ,  $BR = 0.10$  และ  $BR = 0.15$

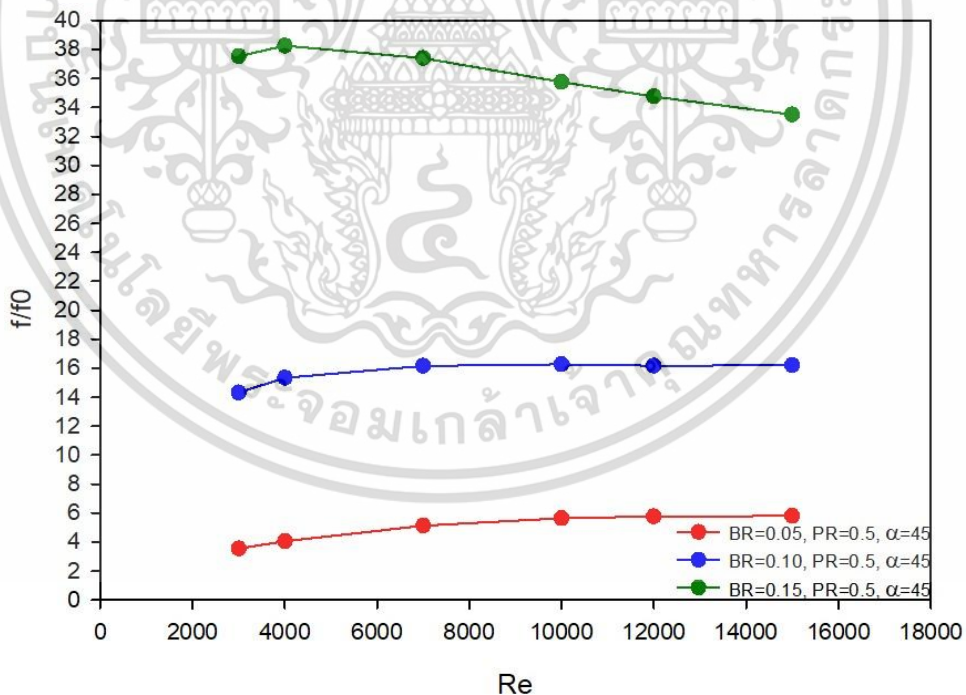


รูปที่ 3.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ระหว่าง  $BR = 0.05$ ,  $BR = 0.10$  และ  $BR = 0.15$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

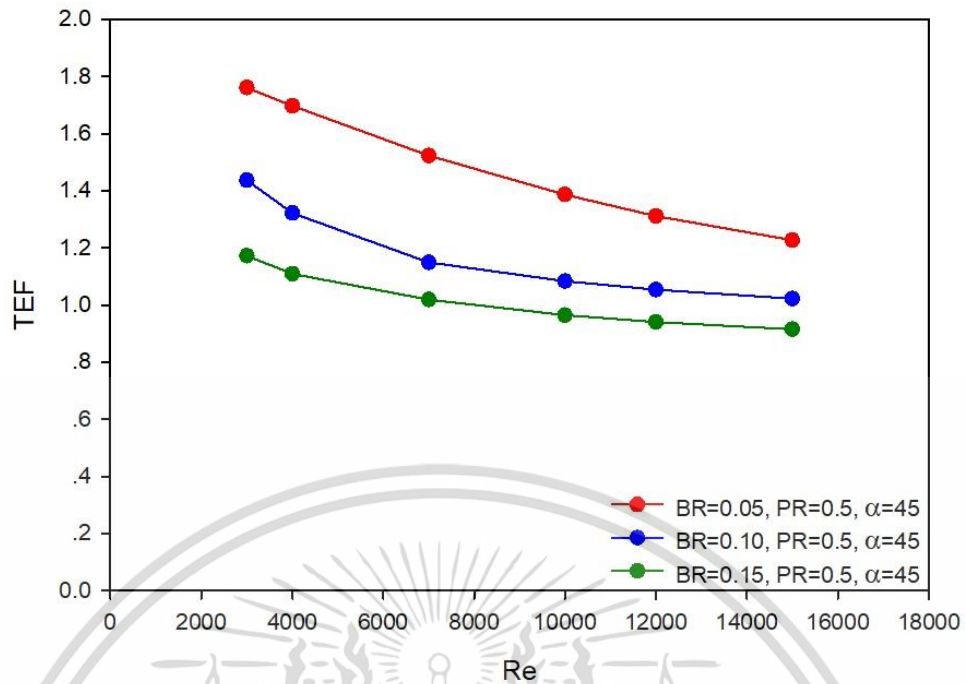


รูปที่ 3.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ระหว่าง  $BR = 0.05$ ,  $BR = 0.10$  และ  $BR = 0.15$



รูปที่ 3.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ระหว่าง  $BR = 0.05$ ,  $BR = 0.10$  และ  $BR = 0.15$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ระหว่าง  $BR = 0.05$ ,  $BR = 0.10$  และ  $BR = 0.15$

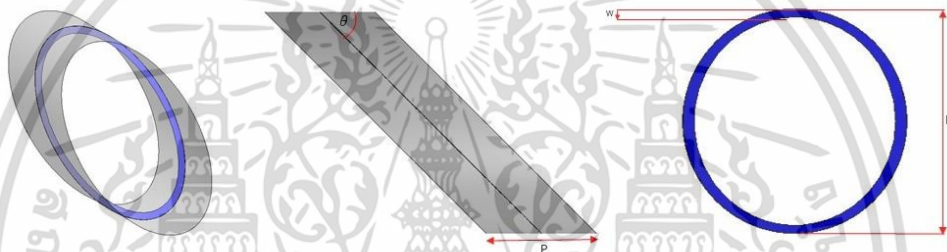
เมื่อได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความกว้างของแผ่นกั้นการไหล ในรูปของอัตราส่วนบล็อกการไหล พบว่าท่อกลมที่ติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลน้อยก็จะมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยเช่นกัน และมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนยังไม่ได้ค่าที่ดีที่สุด ดังนั้น จึงต้องศึกษาอิทธิพลอื่น ๆ เพื่อที่จะเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนต่อไป

### 3.6.3 อิทธิพลของพิตช์

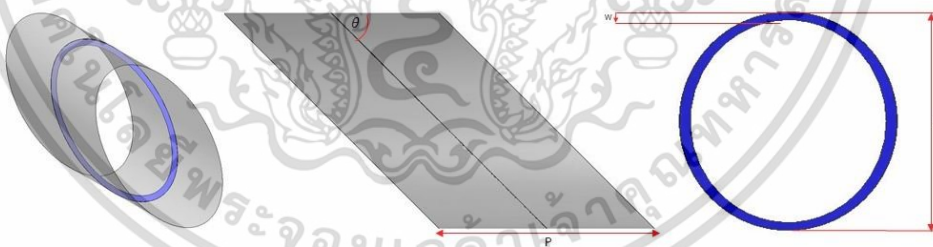
การศึกษาอิทธิพลของพิตช์ ในรูปของอัตราส่วนพิตช์ มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนจากแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน โดยปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนพิตช์ (Pitch Ratio, PR) จาก  $PR = 1$ ,  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ซึ่งการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อกการไหล ( $BR, w/D$ ) = 0.05
2. อัตราส่วนพิตช์ ( $PR, p/D$ ) = 0.5, 1.0, 1.5
3. องศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ ) =  $45^\circ$
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลม ( $D$ ) = 0.05 m

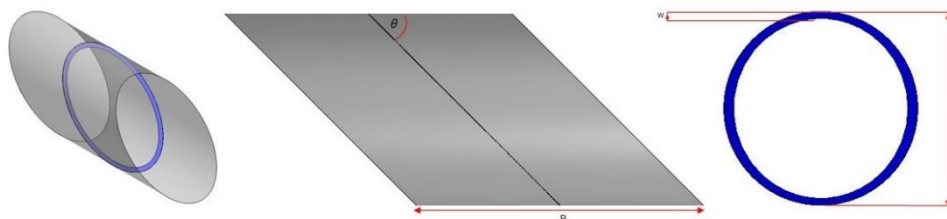
โดย  $w$  คือ ความกว้างของแผ่นกั้นการไหล,  $p$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นการไหลรูปตัววงรี การปรับค่าอิทธิพลของพิตช์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.20 รูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.20 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า  $PR = 0.5$ ,  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 45^\circ$

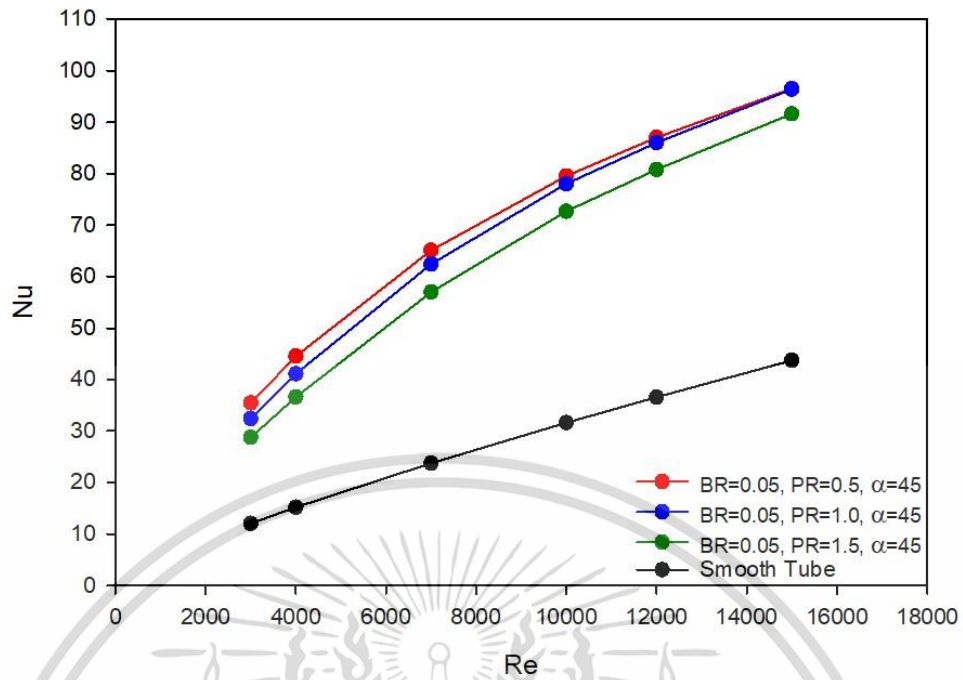


รูปที่ 3.21 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า  $PR = 1.0$ ,  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 45^\circ$

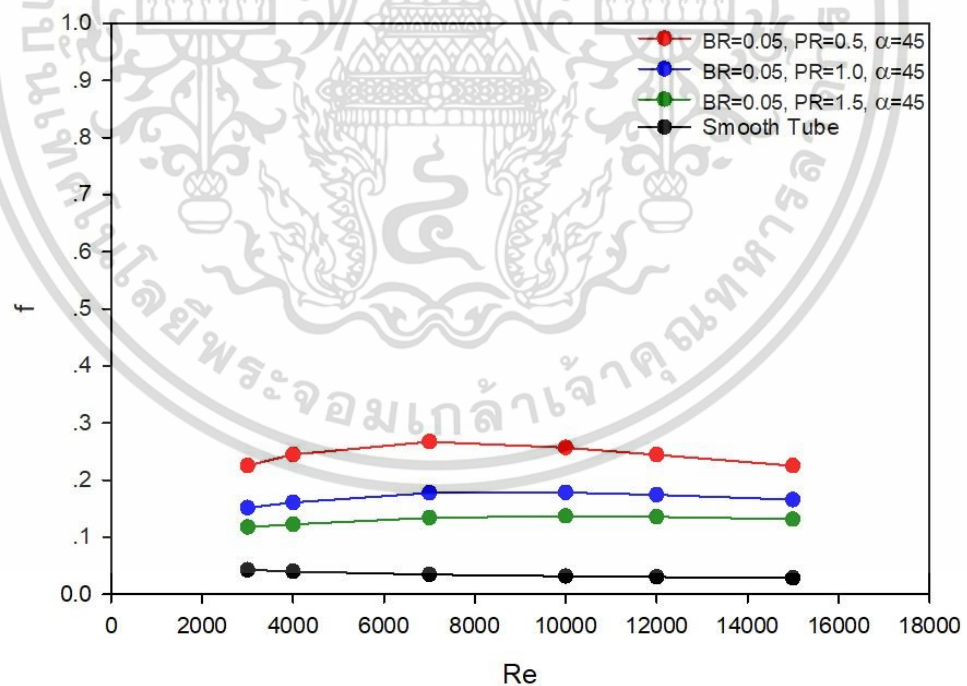


รูปที่ 3.22 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า  $PR = 1.5$ ,  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

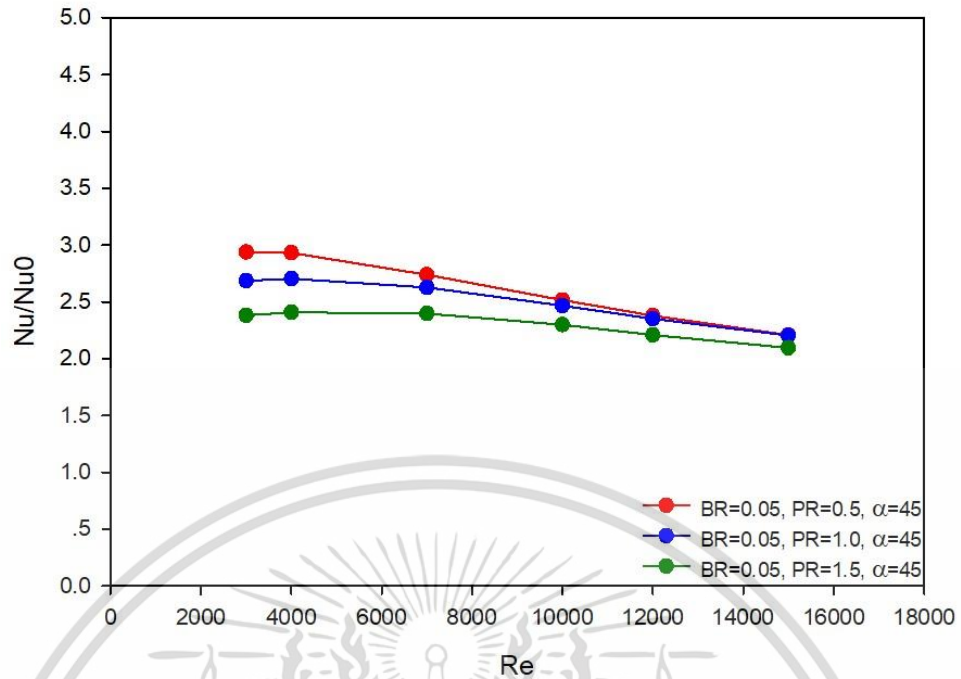


รูปที่ 3.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ระหว่าง  $PR = 0.5$ ,  $PR = 1.0$  และ  $PR = 1.5$

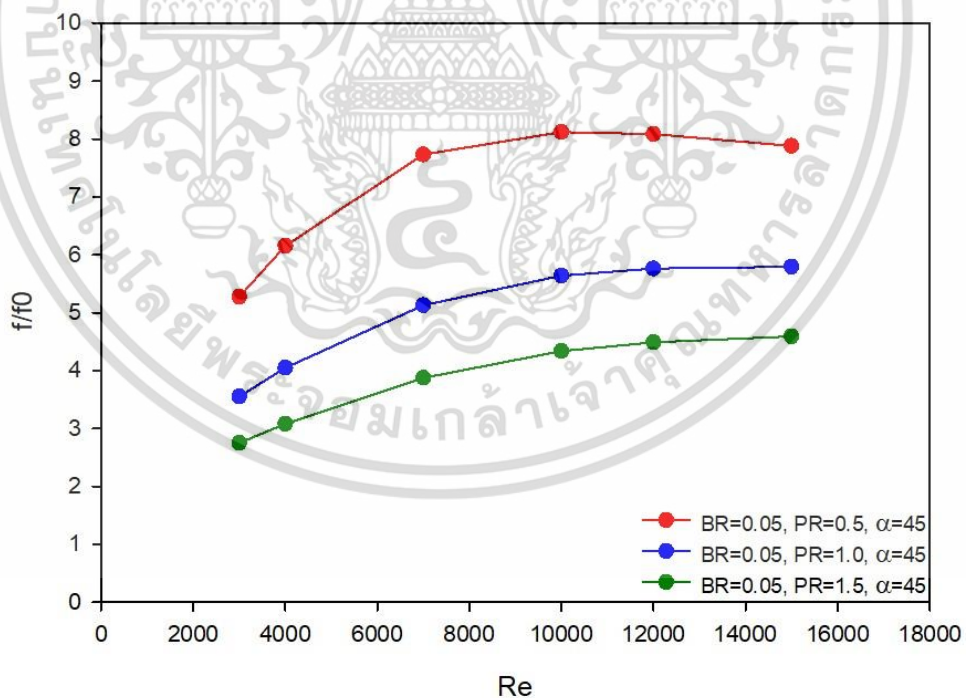


รูปที่ 3.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ระหว่าง  $PR = 0.5$ ,  $PR = 1.0$  และ  $PR = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

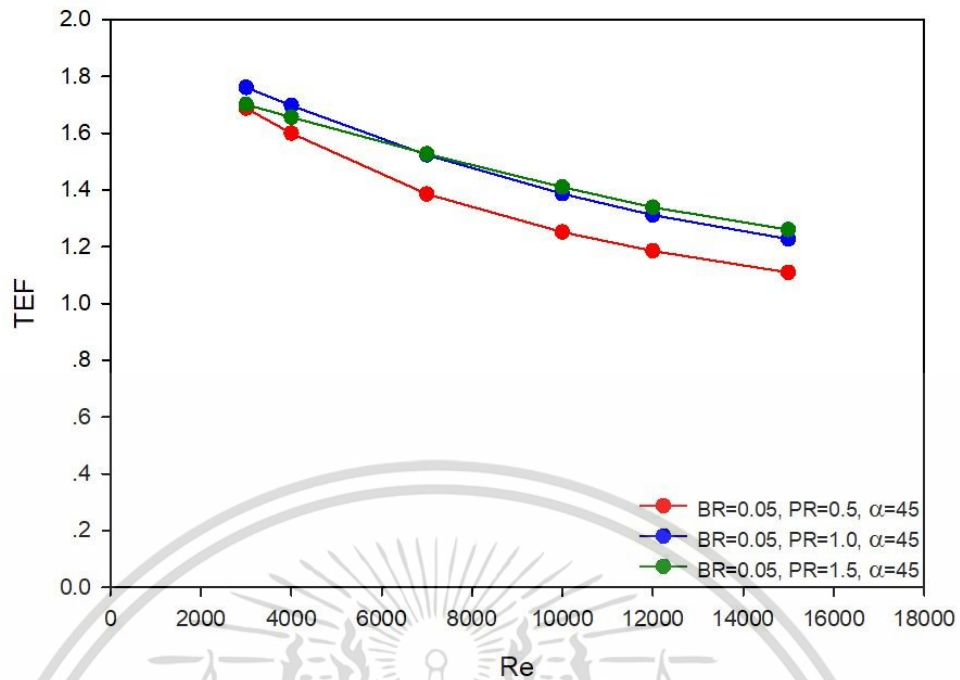


รูปที่ 3.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ระหว่าง  $PR = 0.5$ ,  $PR = 1.0$  และ  $PR = 1.5$



รูปที่ 3.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ระหว่าง  $PR = 0.5$ ,  $PR = 1.0$  และ  $PR = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ระหว่าง  $PR = 0.5$ ,  $PR = 1.0$  และ  $PR = 1.5$

เมื่อได้ทำการศึกษาอิทธิพลของพิตช์ ในรูปของอัตราส่วนพิตช์ พบว่าท่อกลมที่ติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีอัตราส่วนพิตช์น้อย จะสามารถเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนในท่อได้มาก จึงส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ค่าตัวประกอบเสียดทานก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องเลือกค่าอัตราส่วนพิตช์ที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้มีค่าตัวประกอบเสียดทานมากเกินไป และต้องศึกษาอิทธิพลอื่น ๆ เพื่อที่จะลดค่าตัวประกอบเสียดทานต่อไป

### 3.6.4 อิทธิพลของมุมปะทะ

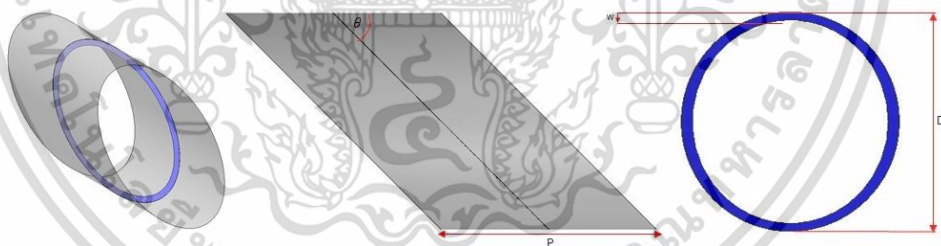
การศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะ มีจุดประสงค์เพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทานจากแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน โดยปรับเปลี่ยนองศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ ) จาก  $PR = 0.5$ ,  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 45^\circ$  ซึ่งการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อกการไหล ( $BR, w/D$ ) = 0.05
2. อัตราส่วนพิตช์ ( $PR, p/D$ ) = 0.5
3. องศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ ) =  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลม ( $D$ ) = 0.05 m

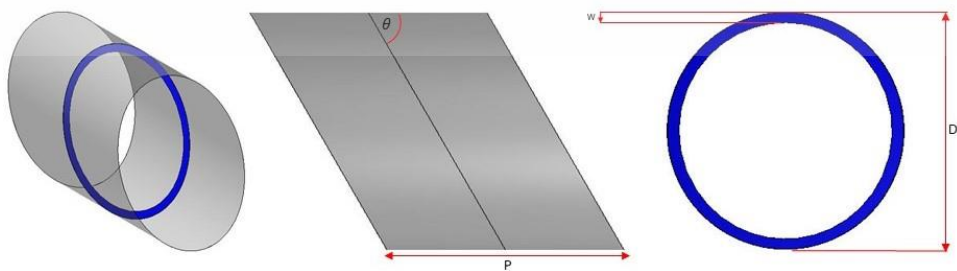
โดย  $w$  คือ ความกว้างของแผ่นกั้นการไหล,  $p$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นการไหลรูปตัววงรี การปรับมุมของการปะทะ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.28 รูปที่ 3.29 และรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.28 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า  $PR = 0.5$ ,  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 30^\circ$

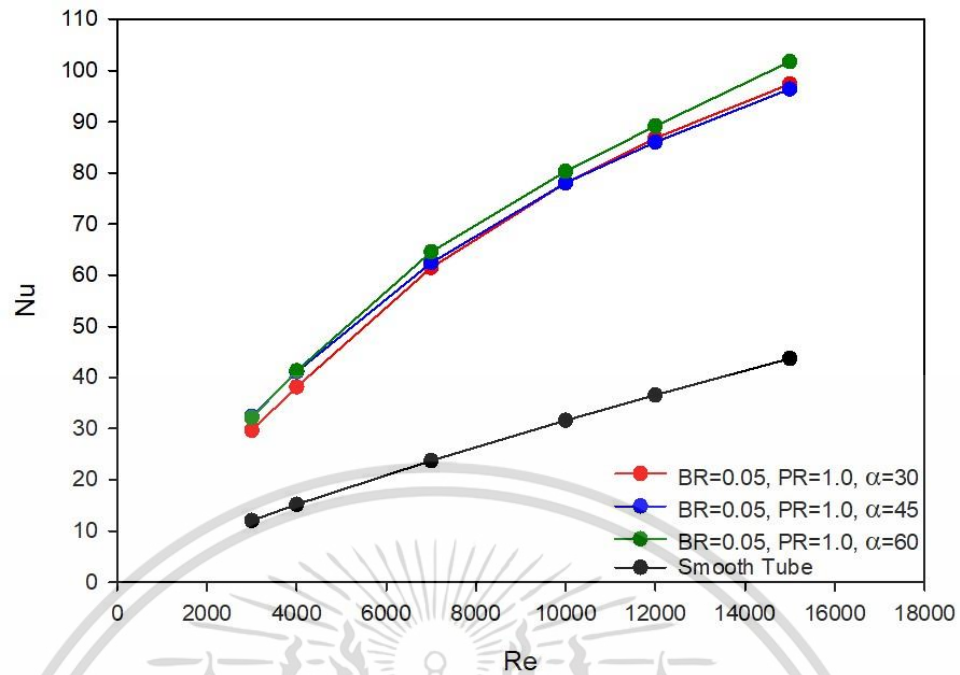


รูปที่ 3.29 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า  $PR = 0.5$ ,  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 45^\circ$

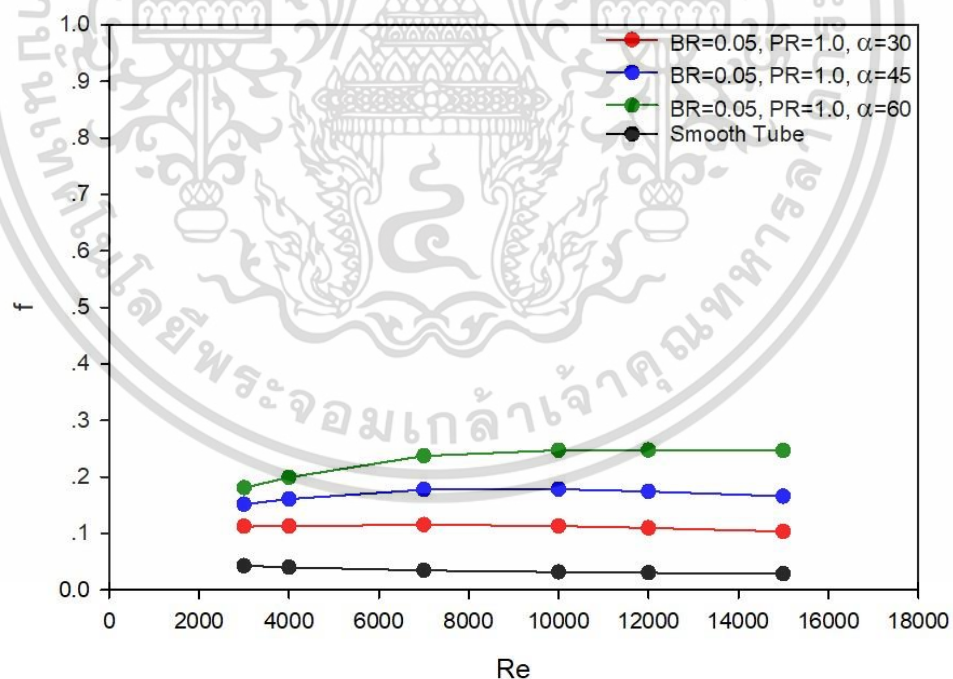


รูปที่ 3.30 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า  $PR = 0.5$ ,  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

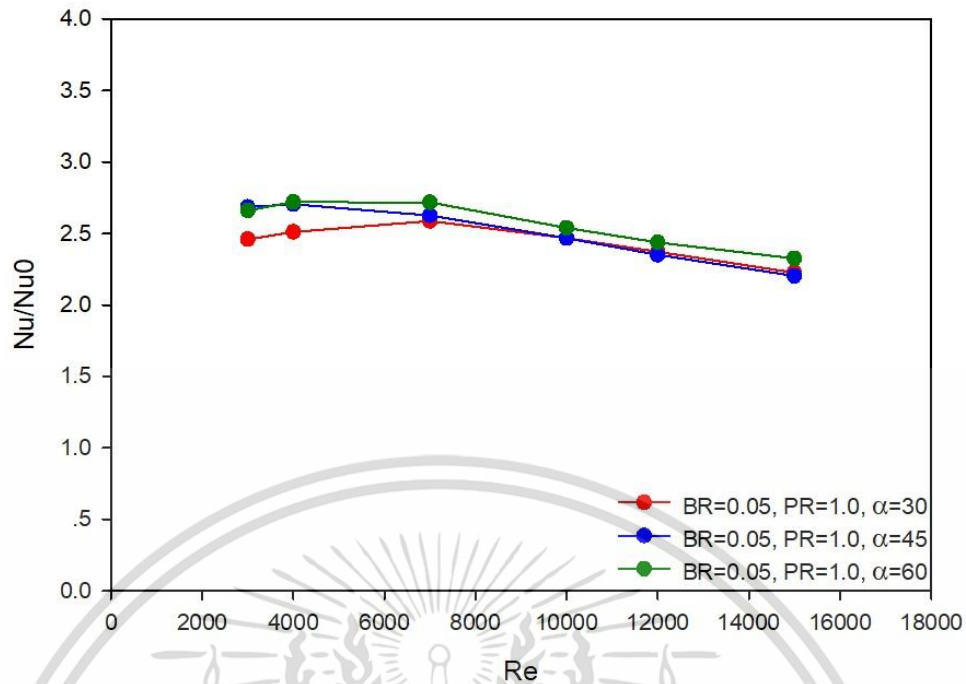


รูปที่ 3.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$  ระหว่าง  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$  และ  $\alpha = 60^\circ$

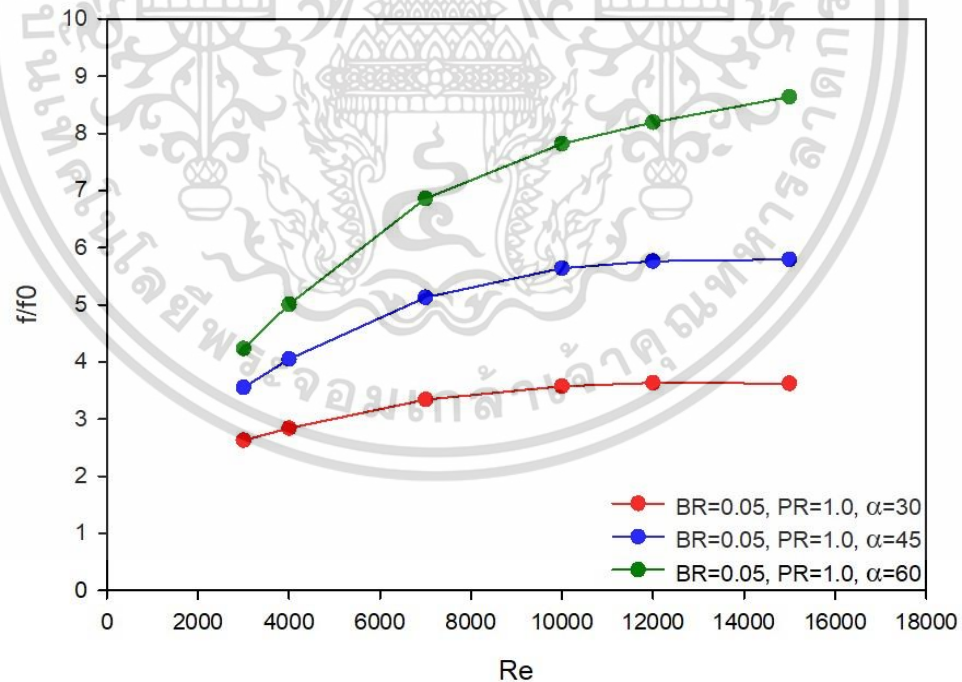


รูปที่ 3.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$  ระหว่าง  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$  และ  $\alpha = 60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

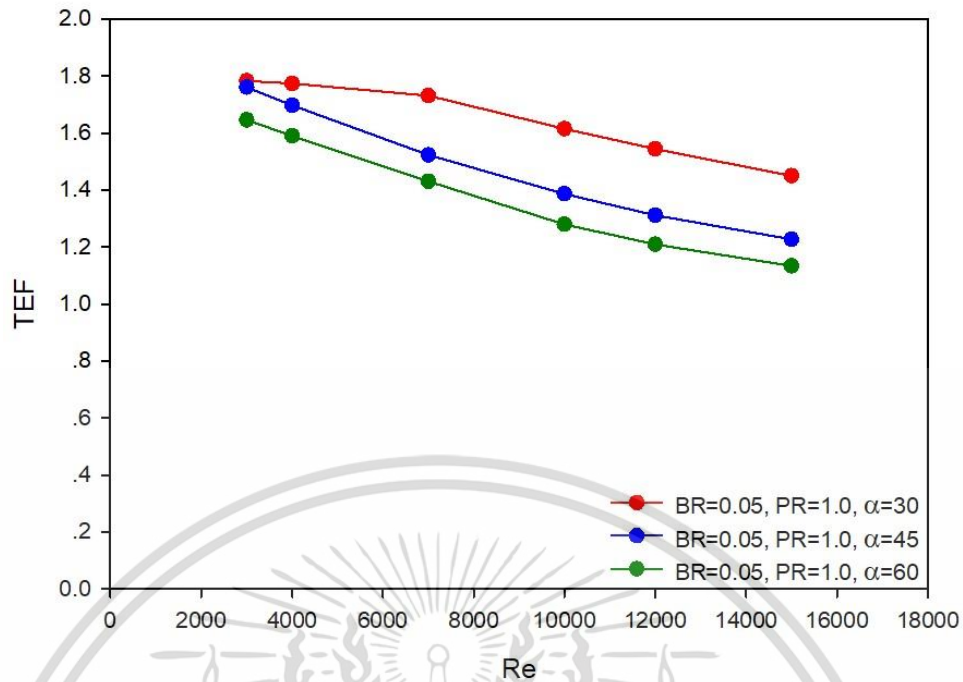


รูปที่ 3.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$  ระหว่าง  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$  และ  $\alpha = 60^\circ$



รูปที่ 3.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$  ระหว่าง  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$  และ  $\alpha = 60^\circ$

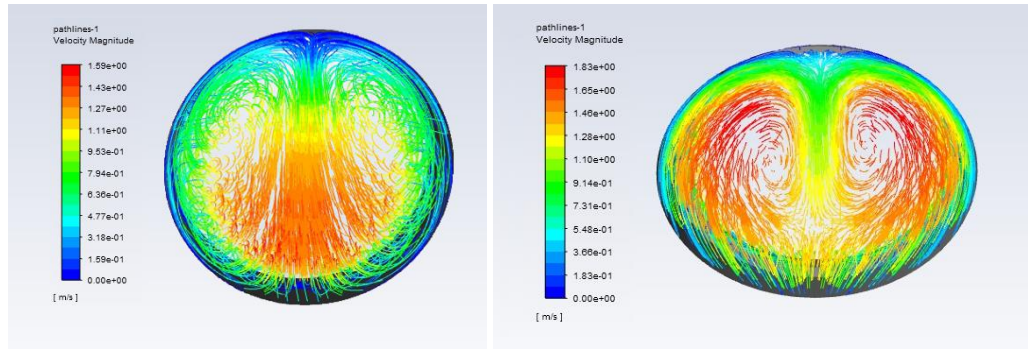
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



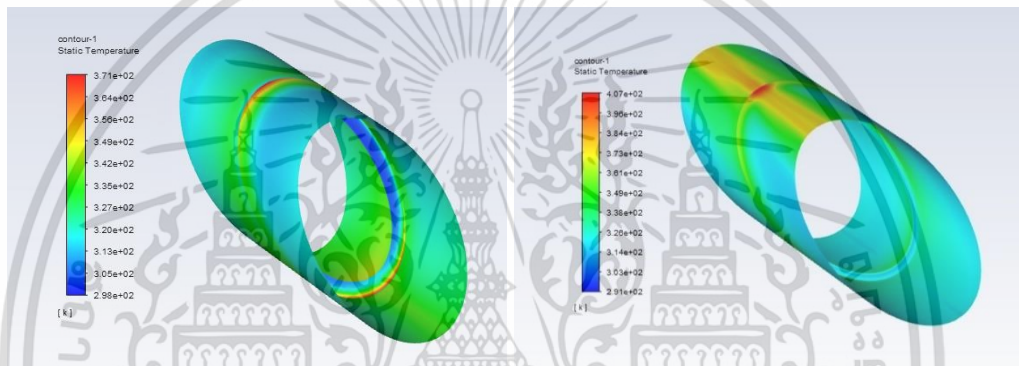
รูปที่ 3.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$  ระหว่าง  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$  และ  $\alpha = 60^\circ$

เมื่อได้ทำการศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะ พบว่าท่อกลมที่ติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีมุมของการปะทะน้อย จะมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยกว่า และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่า เมื่อเทียบกับท่อกลมที่ติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีมุมของการปะทะมากกว่า

จากการศึกษาพบว่าแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีอัตราส่วนการบล็อกการไหลน้อยจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลกับผนังท่อกลมได้ดี และมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อย แผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีอัตราส่วนพิตซ์น้อยจะสามารถเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนในท่อได้มาก แต่ค่าตัวประกอบเสียดทานก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน แผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีมุมของการปะทะน้อยจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีที่สุด และยังสามารถลดค่าตัวประกอบเสียดทานได้อีกด้วย ดังนั้นค่าที่เหมาะสมคือ  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 30^\circ$  ซึ่งมีค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน เท่ากับ 1.78 ที่เลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 3,000



รูปที่ 3.36 การเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน และท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีค่า  $PR = 0.5$ ,  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 30^\circ$



รูปที่ 3.37 การเปรียบเทียบคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิบนท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน และท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีค่า  $PR = 0.5$ ,  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 30^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

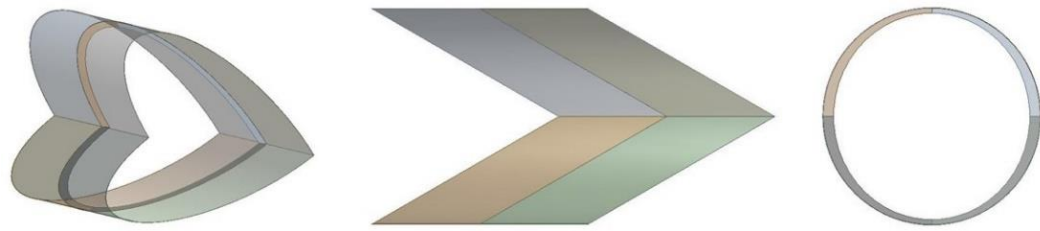
จากการศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน พบว่าการติดตั้งแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีค่า  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 30^\circ$  ภายในท่อกลมสามารถเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนได้ดีที่สุด แต่ก็ยังไม่ได้ค่าที่ดีที่สุด จึงเป็นที่มาที่มาของการพัฒนาแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีรูปแบบต่าง ๆ ในการพัฒนาแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีนั้น จะทำโดยการพับวงแหวนเป็นรูปตัววี แล้วจึงทำการเจาะแผ่นการไหลรูปวงรี และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกมาเป็นมุมต่าง ๆ

#### 4.1 การพัฒนาแผ่นกั้นการไหลโดยการพับเป็นรูปตัววี

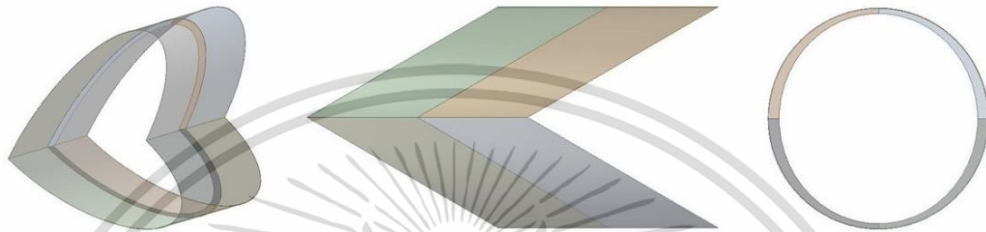
การพัฒนาแผ่นกั้นการไหลโดยการพับเป็นรูปตัววี มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนในของไหล และเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการพับแผ่นกั้นการไหลเป็นรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสามารถกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อกการไหล ( $BR, w/D$ ) = 0.05
2. อัตราส่วนพิทช์ ( $PR, p/D$ ) = 1.0
3. องศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ ) =  $30^\circ$
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลม ( $D$ ) = 0.05 m
5. การพับแผ่นกั้นการไหลเป็นรูปตัววี = V-Upstream, V-Downstream

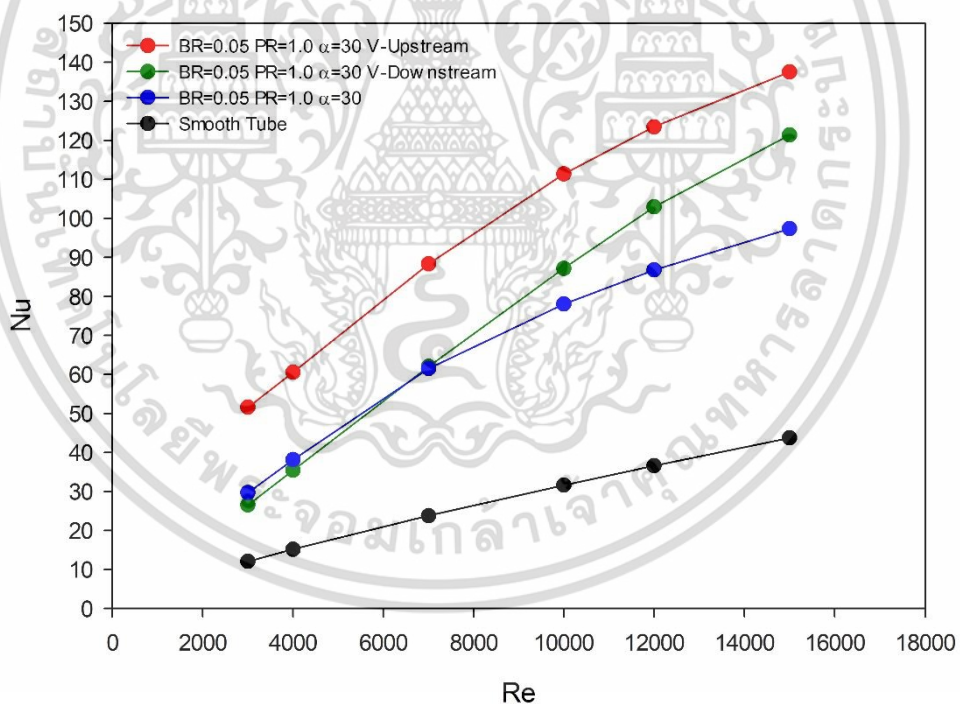
โดย  $w$  คือ ความกว้างของแผ่นกั้นการไหล,  $p$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นการไหลรูปตัววี การพับแผ่นกั้นการไหลเป็นรูปตัววี สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า  
BR = 0.05, PR = 1.0,  $\alpha = 30^\circ$ , V-Upstream

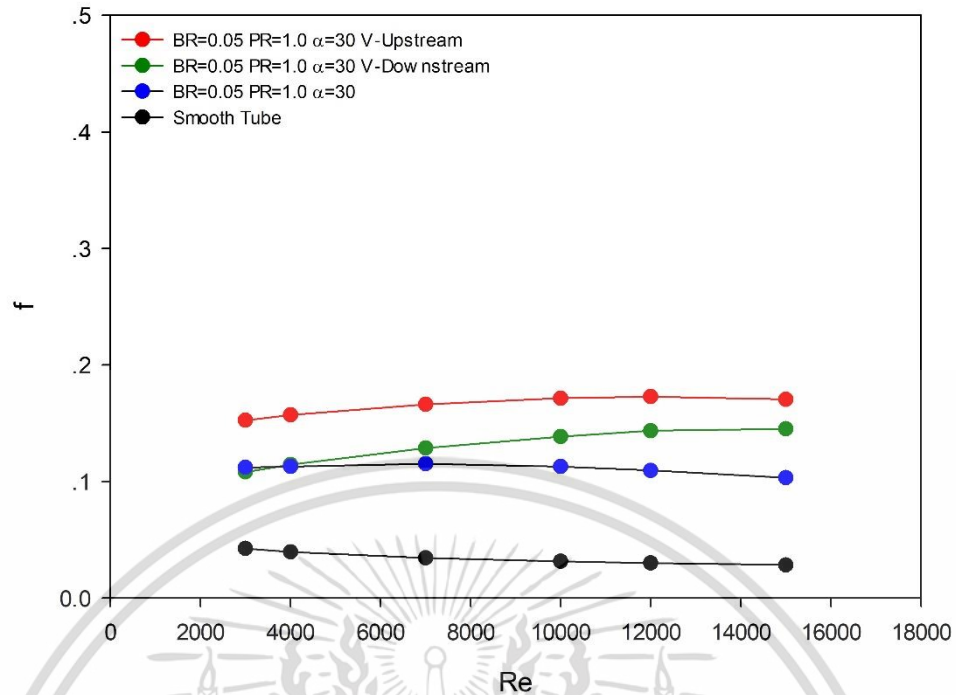


รูปที่ 4.2 ภาพ 3 มิติ ภาพด้านข้าง และภาพด้านหน้าของวงแหวนรูปวงรีที่มีค่า  
BR = 0.05, PR = 1.0,  $\alpha = 30^\circ$ , V-Downstream

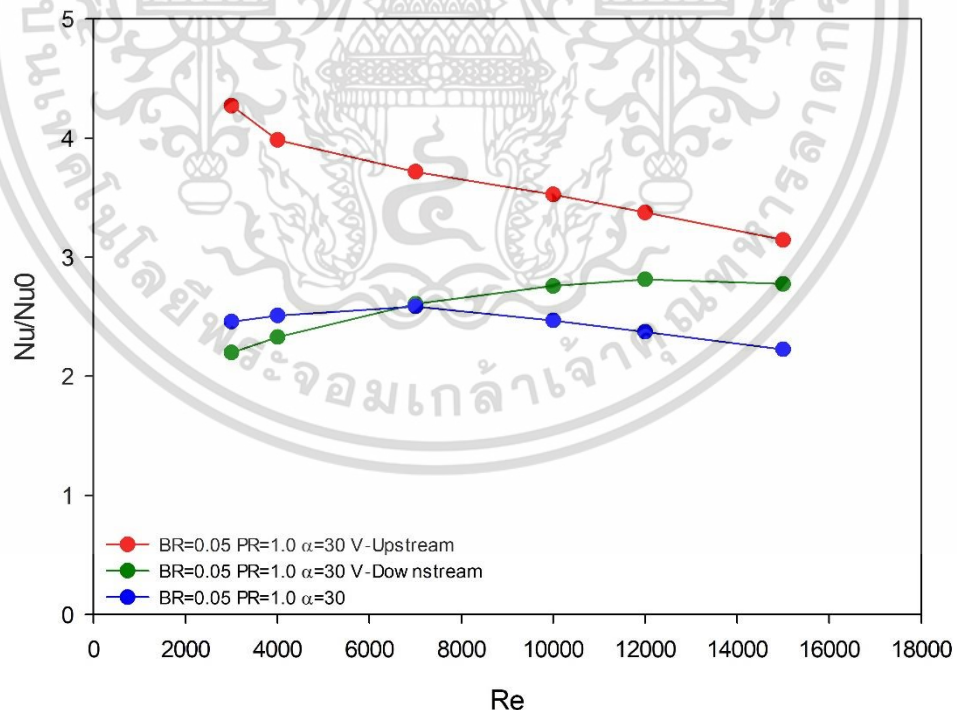


รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่ BR = 0.05, PR = 1.0,  $\alpha = 30^\circ$  ระหว่าง V-Upstream และ V-Downstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

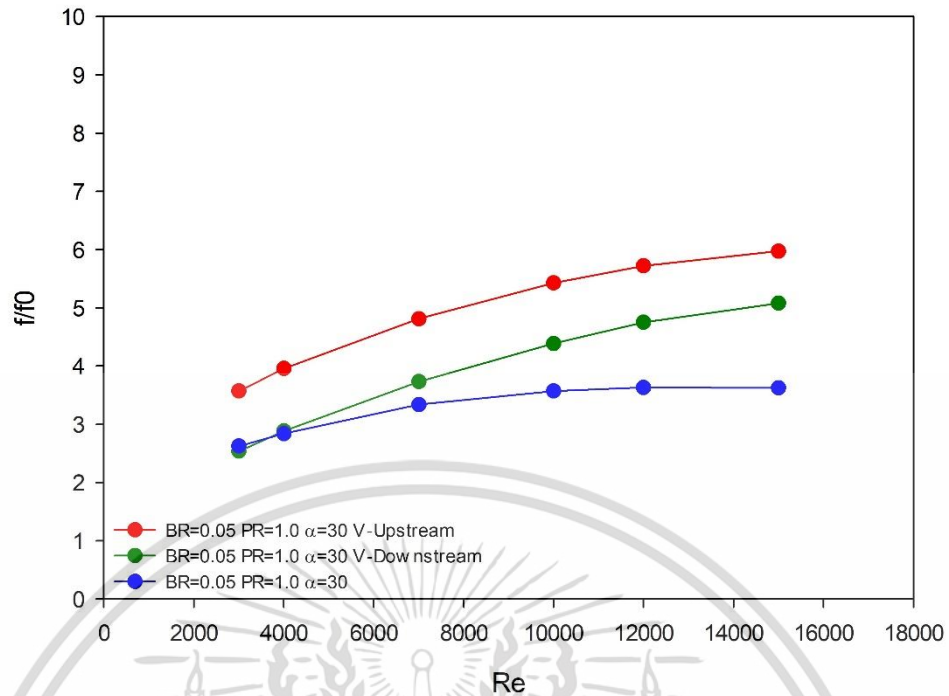


รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 30^\circ$  ระหว่าง V-Upstream และ V-Downstream

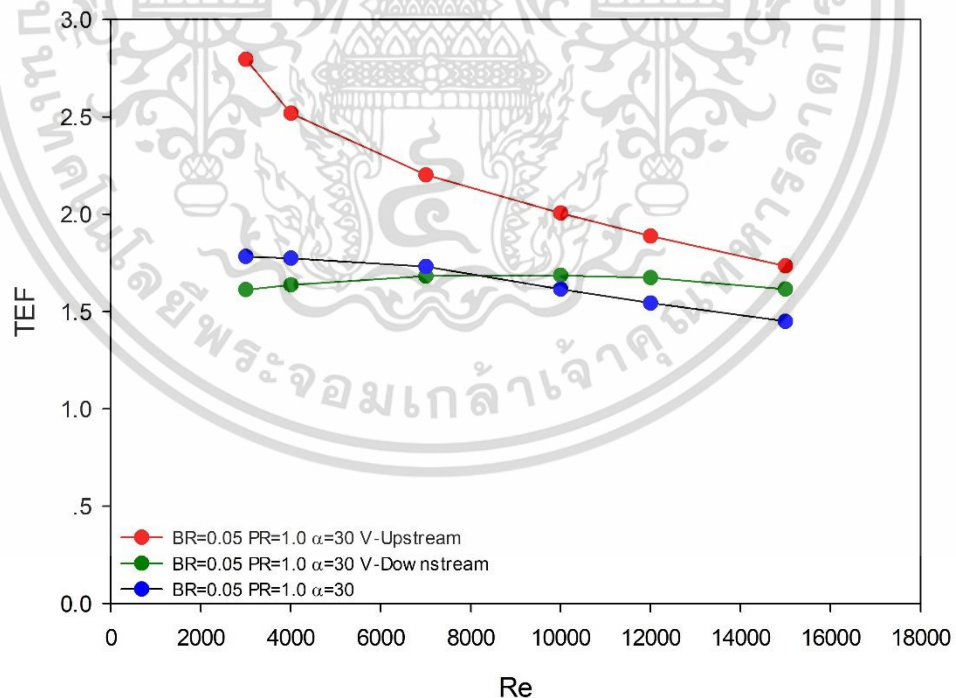


รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 30^\circ$  ระหว่าง V-Upstream และ V-Downstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



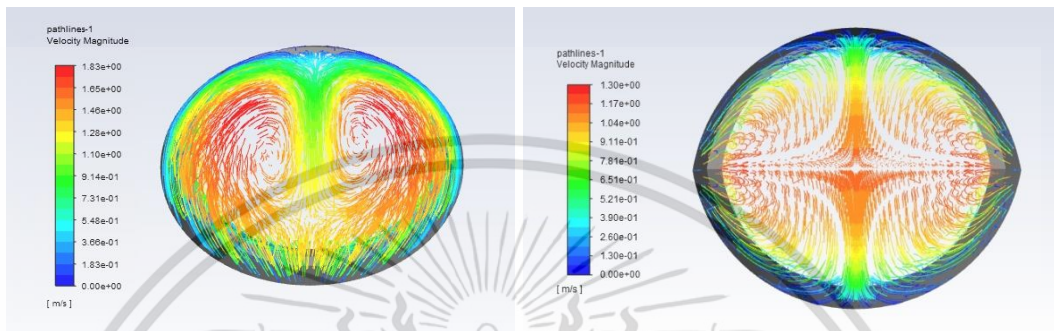
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 30^\circ$  ระหว่าง V-Upstream และ V-Downstream



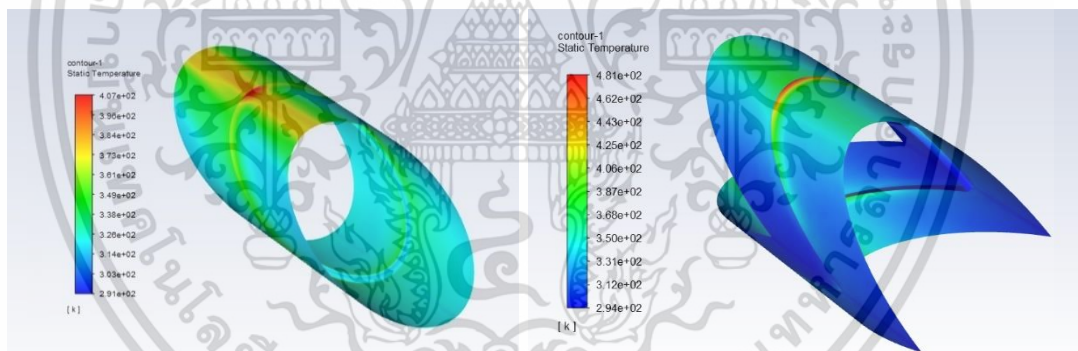
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 30^\circ$  ระหว่าง V-Upstream และ V-Downstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการพับแผ่นกั้นการไหลเป็นรูปตัววี พบว่าการพับแผ่นกั้นการไหลเป็นรูปตัววีในทิศทางสวนกระแสการไหลหรือ V-Upstream จะสามารถเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนในท่อได้มากกว่าแผ่นกั้นการไหลแบบปกติมาก จึงส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นสูงถึง 2.79 ที่เลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 3,000 แต่ค่าตัวประกอบเสียดทานก็จะเพิ่มขึ้นมากเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนางวงแหวนในด้านอื่น ๆ เพื่อที่จะเป็นการเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนต่อไป



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติของท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบปกติ และท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นการไหลที่ถูกพับเป็นรูปตัววีในทิศทางสวนกระแส หรือ V-Upstream



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิบนท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบปกติ และท่อกลมที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นการไหลที่ถูกพับเป็นรูปตัววีในทิศทางสวนกระแส หรือ V-Upstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การพัฒนาแผ่นกั้นการไหลโดยการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ

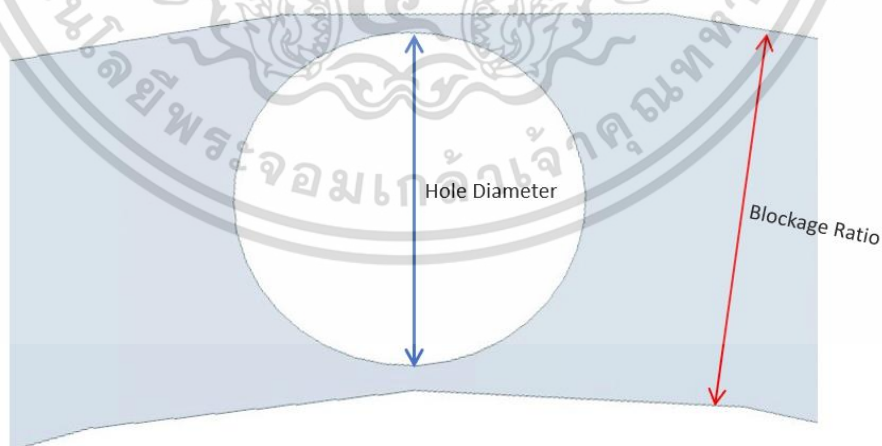
การเจาะรู และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ ที่ครีบบางแหวนนั้นจะทำให้สามารถลดค่าตัวประกอบเสียดทานได้เป็นอย่างมาก และยังสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในจุดที่เป็นมุมอับได้อีกด้วย แต่เราก็ต้องมีการเลือกขนาดรู และจำนวนของรูให้เหมาะสมเช่นกัน มิฉะนั้นพื้นที่ของรูอาจจะมากเกินความจำเป็น จนทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงได้

### 4.2.1 การเลือกขนาดรูที่เหมาะสม

การเลือกขนาดรูที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยการเจาะรูที่แผ่นกั้นการไหลเป็นขนาดต่าง ๆ ซึ่งสามารถกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

1. อัตราส่วนบล็อกการไหล (BR,  $w/D$ ) = 0.05
2. อัตราส่วนพิทช์ (PR,  $p/D$ ) = 1.0
3. องศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ ) =  $30^\circ$
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลม ( $D$ ) = 0.05 m
5. การพับแผ่นกั้นการไหลเป็นรูปตัววี = V-Upstream
6. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะ = 10% - 80% ของอัตราส่วนบล็อกการไหล
7. จำนวนรูที่เจาะ ( $n$ ) = 2
8. องศาของการเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะ ( $\beta$ ) =  $15^\circ$

โดย  $w$  คือ ความกว้างของแผ่นกั้นการไหล,  $p$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นการไหลรูปตัววี ขนาด และลักษณะของรูที่เจาะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ภาพแสดงขนาด และลักษณะของการเจาะรูที่แผ่นกั้นการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.1** ตารางแสดงผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีการเจาะรูขนาดต่าง ๆ

BR=0.05, PR=1.0, $\alpha=30^\circ$ , V-Upstream, n=2, $\beta=15^\circ$ , Re=3000			
Hole Diameter	Nu	$f$	TEF
10%	51.03512	0.15309359	2.764107981
20%	51.17459	0.152301014	2.776461407
30%	50.90989	0.152010466	2.763858865
40%	51.18351	0.152560424	2.775370516
50%	50.88876	0.151674647	2.764749183
60%	51.03518	0.151702384	2.772535079
70%	51.09198	0.152443524	2.771115369
80%	51.38158	0.15159473	2.792014186

เมื่อได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเจาะรูที่แผ่นกั้นการไหลขนาดต่าง ๆ พบว่ายิ่งเจาะรูใหญ่ขึ้นก็จะทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานลดลง จึงส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกที่จะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะ เท่ากับ 80% ของอัตราส่วนบล็อกการไหล ในการพัฒนาแผ่นกั้นการไหลต่อไป

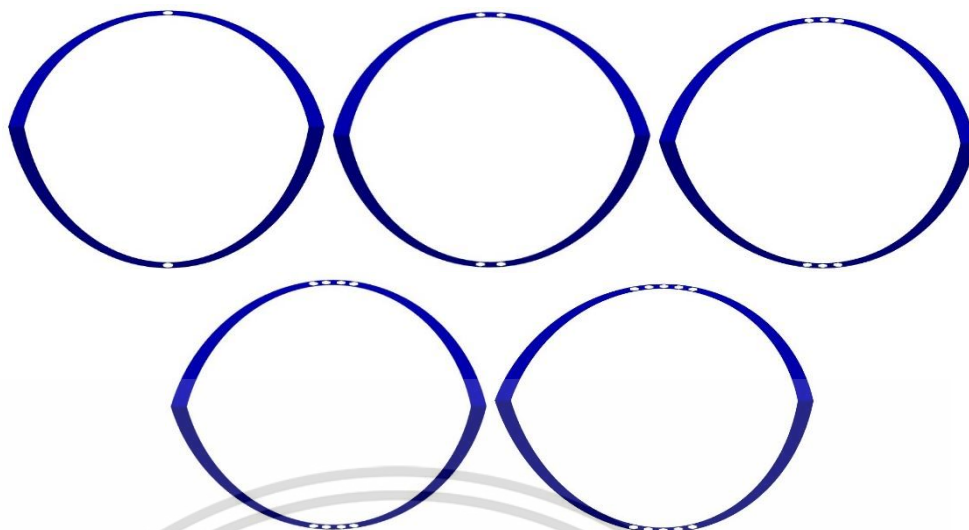
#### 4.2.2 การเลือกจำนวนรู และมุมการเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะที่เหมาะสม

การศึกษาอิทธิพลของการเจาะรูแผ่นกั้นการไหลเป็นจำนวน 10 รู และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

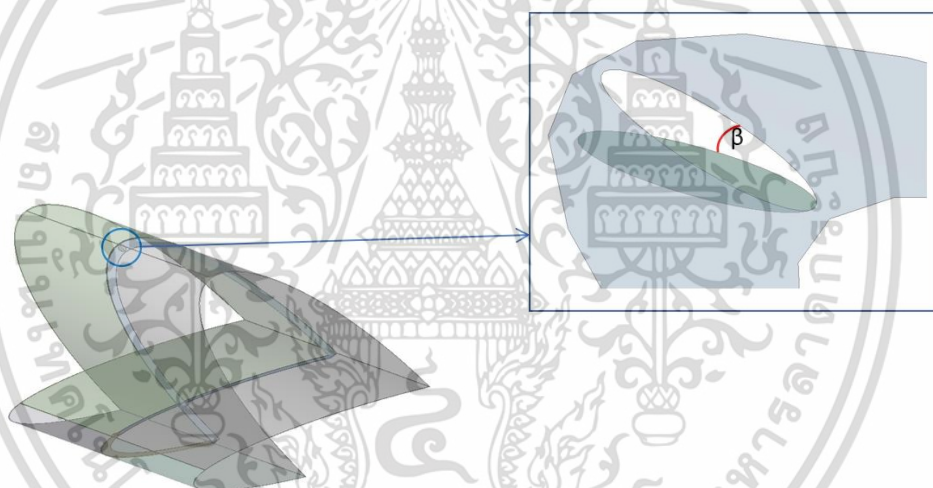
1. อัตราส่วนบล็อกการไหล (BR, w/D) = 0.05
2. อัตราส่วนพิตช์ (PR, p/D) = 1.0
3. องศาของมุมปะทะ ( $\alpha$ ) =  $30^\circ$
4. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลม (D) = 0.05 m
5. การพับแผ่นกั้นการไหลเป็นรูปตัววี = V-Upstream
6. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะ = 80% ของอัตราส่วนบล็อกการไหล
7. จำนวนรูที่เจาะ (n) = 2, 4, 6, 8, 10
8. องศาของการเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะ ( $\beta$ ) =  $7.5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $22.5^\circ$

โดย w คือ ความกว้างของแผ่นกั้นการไหล, P คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นการไหลรูปตัววี ลักษณะการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และการเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

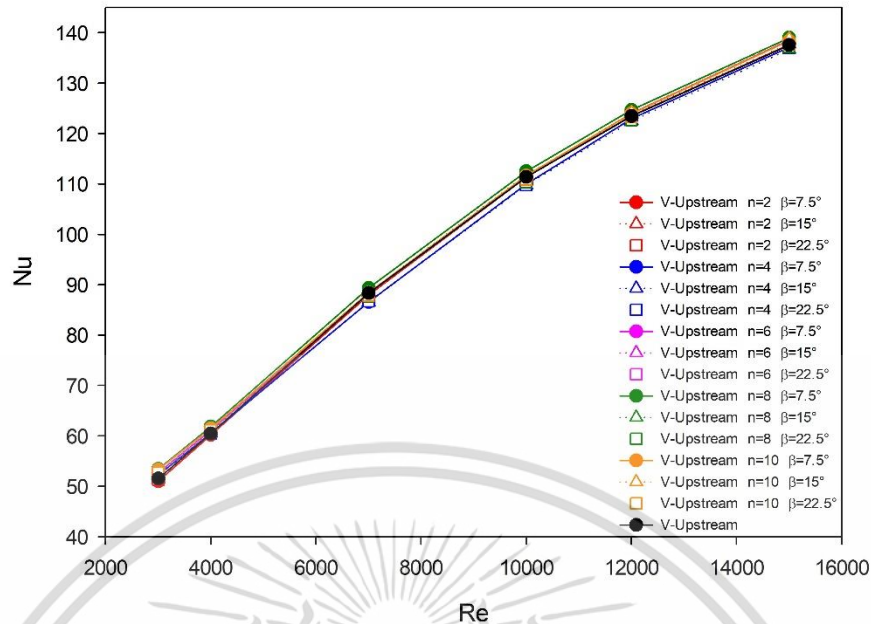


รูปที่ 4.11 ภาพแสดงลักษณะการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ ที่แผ่นกั้นการไหล



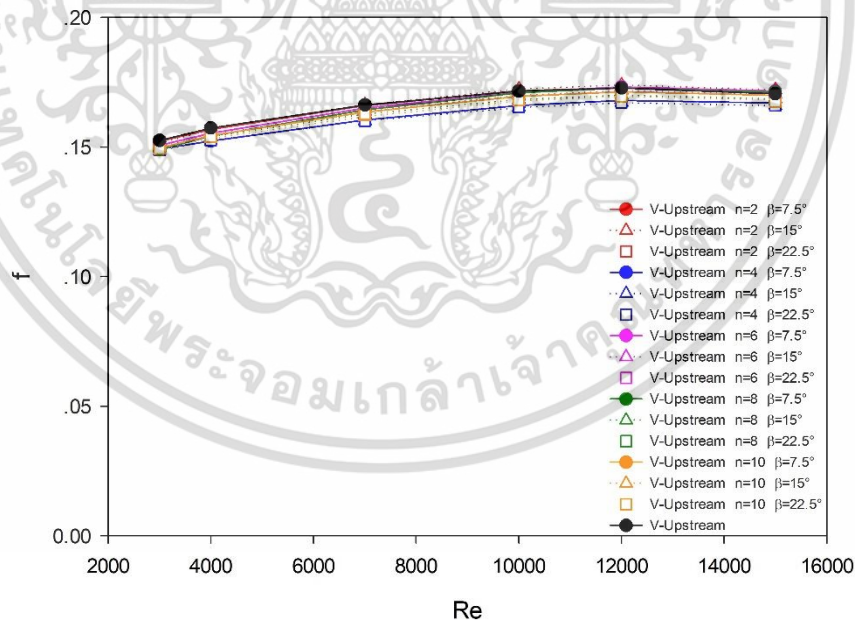
รูปที่ 4.12 ภาพแสดงลักษณะการเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ ที่แผ่นกั้นการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13

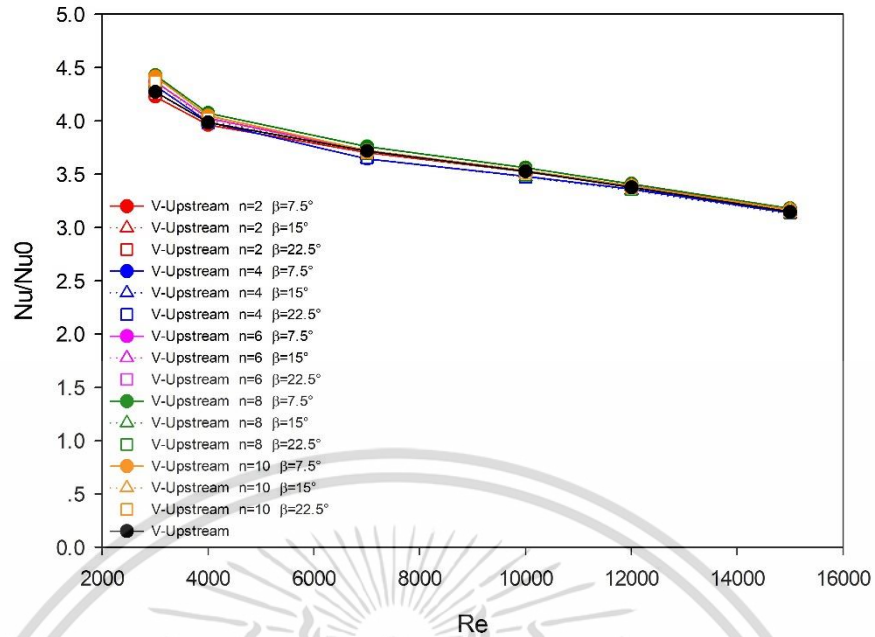
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์ (Nu) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 30^\circ$ , V-Upstream ระหว่างการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ



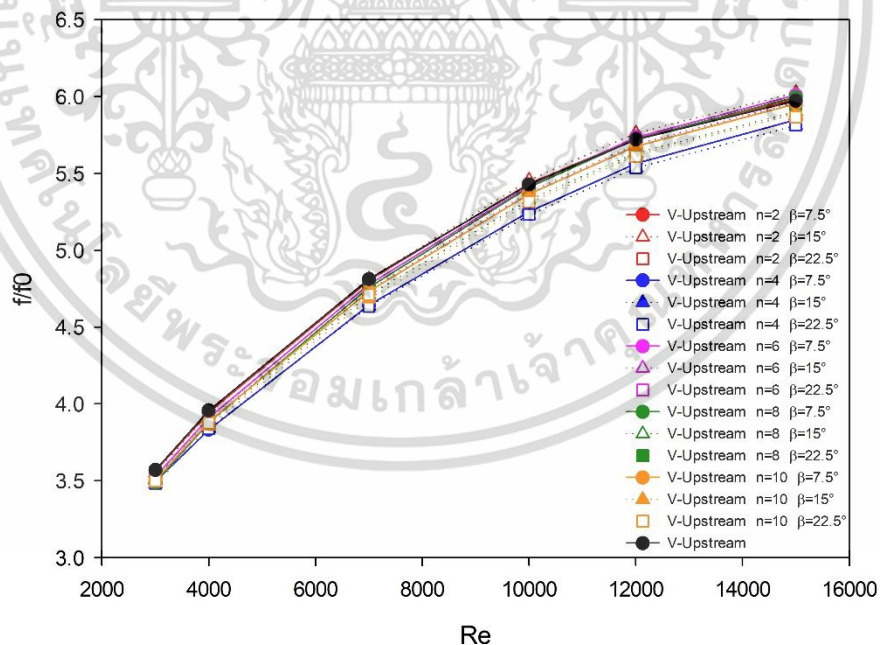
รูปที่ 4.14

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 30^\circ$ , V-Upstream ระหว่างการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

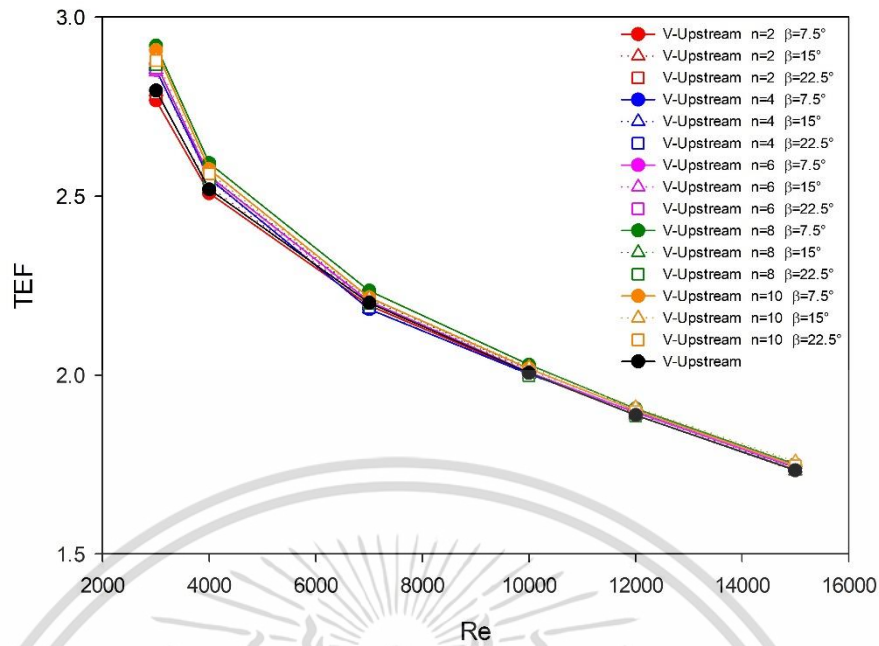


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 30^\circ$ , V-Upstream ระหว่างการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ



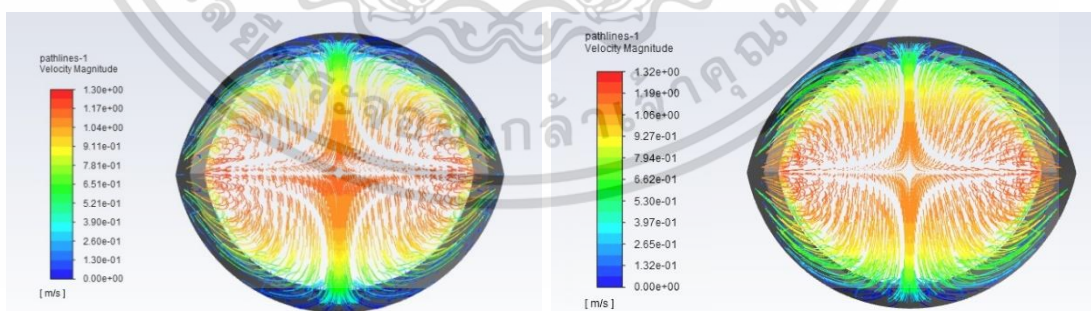
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 30^\circ$ , V-Upstream ระหว่างการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



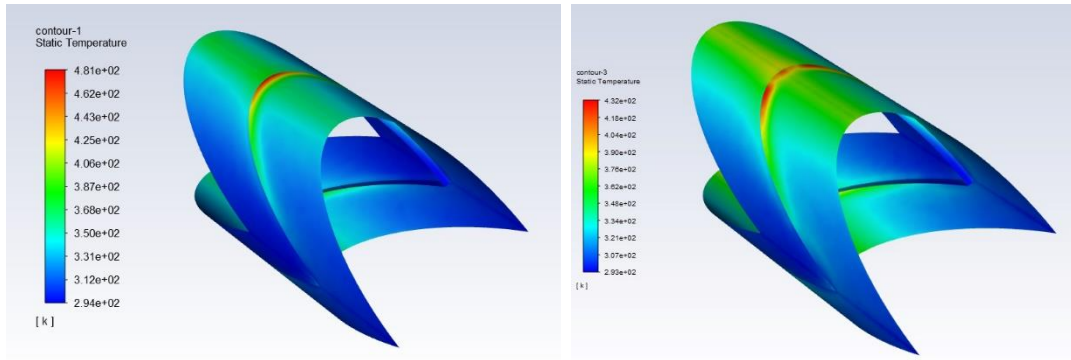
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อกลมที่มีการติดตั้งกั้นการไหลรูปวงรีที่  $BR = 0.05$ ,  $PR = 1.0$ ,  $\alpha = 30^\circ$ , V-Upstream ระหว่างการเจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ

จากการศึกษาพบว่าแผ่นกั้นการไหลรูปวงรีที่มีการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80% ของอัตราส่วนบล็อกการไหล การเจาะรูเป็นจำนวน 8 รู และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุม  $7.5^\circ$  จะสามารถลดค่าตัวประกอบเสียดทาน และเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในจุดที่เป็นมุมอับได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน เท่ากับ 2.92 ที่เลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 3,000



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบเส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติของท่อกลมที่มีการติดตั้งกั้นการไหลที่ถูกพับเป็นรูปตัววี และท่อกลมที่มีการติดตั้งกั้นการไหลที่ถูกพับเป็นรูปตัววี เจาะรูเป็นจำนวน 8 รู และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุม  $7.5^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิบนท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกพับเป็นรูปตัววี และท่อกลมที่มีการติดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกพับเป็นรูปตัววี เจาะรูเป็นจำนวน 8 รู และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุม  $7.5^\circ$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ ที่ส่งผลต่ออัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน และค่าตัวประกอบเสียดทาน พบว่าเมื่ออัตราส่วนการบล็อกการไหลมีค่าน้อยจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลกับผนังท่อกลมได้ดี และมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อย เมื่ออัตราส่วนพิทช์มีค่าน้อยจะสามารถเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนในท่อได้มาก แต่ค่าตัวประกอบเสียดทานก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อมุมของการปะทะมีค่าน้อยจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีที่สุด และยังสามารถลดค่าตัวประกอบเสียดทานได้อีกด้วย ดังนั้นค่าที่เหมาะสมคือ  $PR = 0.5$ ,  $BR = 0.05$ ,  $\alpha = 30^\circ$  ซึ่งมีค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน เท่ากับ 1.78 ที่เลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 3,000

จากการพัฒนาแผ่นกั้นการไหลโดยการพับแผ่นกั้นการไหลเป็นรูปตัววี พบว่าการพับแผ่นกั้นการไหลเป็นรูปตัววีสามารถเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนในท่อได้มากกว่าแผ่นกั้นการไหลแบบปกติมาก จึงส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยการพับแผ่นกั้นการไหลเป็นรูปตัววีในทิศทางสวนกระแสหรือ V-Upstream ซึ่งมีค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน เท่ากับ 2.79 ที่เลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 3,000

จากการพัฒนาแผ่นกั้นการไหลโดยการเจาะรู และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ พบว่า การเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80% ของอัตราส่วนบล็อกการไหลสามารถลดค่าตัวประกอบเสียดทานได้ดีที่สุด และการเจาะรูเป็นจำนวน 8 รู และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุม  $7.5^\circ$  จะสามารถลดค่าตัวประกอบเสียดทาน และเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในจุดที่เป็นมุมอับได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน เท่ากับ 2.92 ที่เลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 3,000

ผลที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ การพัฒนาแผ่นกั้นการไหลโดยการพับแผ่นกั้นการไหลเป็นรูปตัววี และการพัฒนาแผ่นกั้นการไหลโดยการเจาะรู และเปิดแผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ สามารถสรุปผลที่ได้จากแผ่นกั้นการไหลที่ดีที่สุดในแต่ละกรณีได้ดังตารางที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 สรุปผลที่ได้จากแผ่นกั้นการไหลที่ดีที่สุดในแต่ละกรณี

รูปแบบการศึกษา	Nu	$f$	TEF
ท่อกลมที่ไม่มีการติดแผ่นกั้นการไหลรูปวงรี	12.06324	0.042698	1
แผ่นกั้นการไหลรูปวงรีแบบพื้นฐาน (BR = 0.10, PR = 1.0, $\alpha = 45^\circ$ )	42.0794	0.611067	1.436
แผ่นกั้นการไหลรูปวงรีหลังจากศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ (BR = 0.05, PR = 1.0, $\alpha = 30^\circ$ )	29.67484	0.112152	1.782889
แผ่นกั้นการไหลรูปวงรีหลังจากการพัฒนาแผ่นกั้นการไหล โดยการพับเป็นรูปตัววี (BR = 0.05, PR = 1.0, $\alpha = 30^\circ$ , V-Upstream)	51.5326	0.152485	2.794758
แผ่นกั้นการไหลรูปวงรีหลังจากการพัฒนาแผ่นกั้นการไหล โดยการพับเป็นรูปตัววี เจาะรูเป็นจำนวนรูต่าง ๆ และเปิด แผ่นกั้นการไหลที่ถูกเจาะออกเป็นมุมต่าง ๆ (BR = 0.05, PR = 1.0, $\alpha = 30^\circ$ , V-Upstream, $n = 8$ , $\beta = 7.5^\circ$ )	53.43286	0.149	2.920233

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะและการพัฒนางานวิจัย

จากงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถทราบได้ว่าการใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขในการจำลองพฤติกรรมกรไหลในท่อกลมที่มีการตีแผ่นกั้นการไหลแบบต่าง ๆ มีข้อดีคือ สามารถลดต้นทุนที่ใช้ในการทดลองได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามการใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นเพียงการประมาณค่าเท่านั้น และในการพัฒนางานวิจัยต่อไปอยากเสนอแนะเรื่องรูปแบบการเพิ่มจำนวนยอดแหลมของการพับแผ่นกั้นการไหลว่า หากมีการเพิ่มยอดแหลมของการพับวงแหวนนั้น จะส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนอย่างไร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Bureau of Energy Human Resource Development. 2019. The Practical Energy Management Training. Retrieved November 14, 2019, from [http://www2.dede.go.th/bhrd/old/file\\_handbook.html](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/file_handbook.html)
- [2] Pongjet Promvonge, Narin Koolnapadol, Monsak Pimsarn, Chinaruk Thianpong. 2014. Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings, Applied Thermal Engineering. Vol. 62, pp. 285 – 292.
- [3] Pongjet Promvonge, Sombat Tamna, Monsak Pimsarn, Chinaruk Thianpong. 2015. Thermal characterization in a circular tube fitted with inclined horseshoe baffles, Applied Thermal Engineering. Vol. 75, pp. 1147 – 1155.
- [4] C. Zhaia, M.D. Islamb, R. Simmons, I. Barsoumb. 2019. Heat transfer augmentation in a circular tube with delta winglet vortex generator pairs, International Journal of Thermal Sciences. Vol. 140, pp. 480 – 490.