การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อที่ใส่กรวยวงรี

Numerical Heat Transfer Investigation in a Tube with Elliptical Conical Ring

ภณิดา ผลนิมิตร[1], สมบัติ ทำนา[2]*, สุริยา โชคเพิ่มพูน[3], พงษ์ศักดิ์ คำมูล[1] และ พงษ์เจต พรหมวงศ์[1]

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

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

[3] สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร เลขที่ 199 หมู่ 3 ถนนพังโคน-วาริชภูมิ ตำบลพังโคน อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160

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

บทคัดย่อ

ตัวสร้างการไหลปั่นป่วนชนิดแหวนกรวยวงรีตัด ได้ดัดแปลงจากกรวยแบบดั้งเดิมโดยการตัดทำมุม α=12.82° กับแนวระนาบ ถูกใช้เพื่อสร้างการไหลหมุนวนในท่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า (D_{Ri}=0.5) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก (D_{Ro}=0.9) อัตราส่วนความรี ($E_l=d_i/D_i=d_o/D_o$) กำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.5 และที่อัตราส่วนระยะพิตซ์แตกต่างกันที่ (P_R=1.5, 2 และ 2.5) ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลดส์เท่ากับ 3000 ถึง 20,000 ในท่อที่มีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ผลจากการศึกษาเสนอในรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในรูปของเลขนัสเซิลท์และค่าตัวประกอบเสียดทาน ตามลำดับ ผลจากการศึกษาเชิงตัวเลขพบว่ากรวยวงรีที่ติดตั้งในท่อกลมช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ โดยกรวยวงรีดัดแปลงที่ α=12.82° ให้ค่าความดันตกคร่อมมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรวยวงรีเดิม และพบว่าอัตราส่วนระยะพิตซ์ P_R=1.5 จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด การใช้กรวยวงรีไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน แต่ยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลงในกรณีที่ P_R สูงขึ้น

คำหลัก: เลขเรย์โนลดส์; การถ่ายเทความร้อน; กรวยวงรี; ฟลักซ์ความร้อน

Abstract

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

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

1. บทนำ

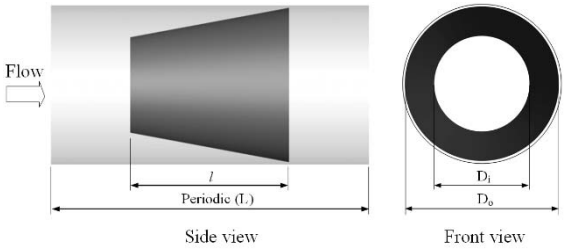
เนื่องจากการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านความร้อน การมีระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีจะส่งผลอย่างมากต่อการประหยัดพลังงาน ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการสร้างความปั่นป่วนให้กับการไหลของของไหลที่จะไปช่วยในการลดชั้นชิดผิวให้บางลง ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ได้ผลดีในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน การพิจารณาการไหลที่มีการปรับตัวเต็มที่ในท่อ (fully develop) และพิจารณาการไหลแบบเป็นคาบ (periodic) ได้ทำการศึกษาโดย Patankar และคณะ [1] ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายโดยใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลและพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อโดยการเพิ่มตัวสร้างการไหลปั่นป่วนในลักษณะต่าง ๆ โดยการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข Muthusamy และคณะ [2] ได้ศึกษาผลของอุปกรณ์สร้างการไหลความปั่นป่วนรูปกรวยต่อการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการสอดใส่กรวยภายในท่อกลมช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น Yakut และคณะ [3] ยังได้ศึกษาผลกระทบของตัวสร้างการไหลปั่นป่วนต่อการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน ความดันตกคร่อมและการไหลที่เกิดจากการสั่นสะเทือน ต่อมา Promvonge [4] ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่สอดใส่แหวนทรงกรวย จากการทดลองพบว่าแหวนทรงกรวยมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน การจัดวางแหวนทรงกรวยส่งผลให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น การจัดวางแบบลู่เข้า (CR), แบบบานออก (DR) และแบบลู่เข้า-บานออก (CDR) ให้ค่าเลขนัสเซิลท์เพิ่มขึ้นถึง 197%, 333% และ 237% ตามลำดับ งานวิจัยต่อมา Eiamsa-ard และคณะ [5] ได้ศึกษาเชิงการทดลองของการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจากการไหลในท่อที่มีการติดตั้งกรวยพรุน โดยศึกษาที่อัตราส่วนระยะพิตช์ (*PR*=4, 6 และ 12) และจำนวนรูพรุนที่ต่างกัน (*N*=4, 6 และ 8 รู) โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ พบว่าการสอดใส่แหวนรูปกรวยพรุนส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น และ จำนวนรูพรุนของกรวยก็ส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของท่อด้วยเช่นกัน โดยการสอดใส่กรวยพรุนเข้าไปภายในท่อสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 137% เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีการสอดใส่กรวย และให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประมาณ 0.92 ที่ *PR*=4 และ *PR*=8 ที่ค่าเลขเรย์โนลดส์เท่ากับ 4000 จากนั้น Anvari และคณะ [6] ได้ทำการวิจัยเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนในท่อที่สอดใส่แหวนทรงกรวยโดยใช้น้ำเป็นของไหลทดสอบ พบว่าตัวสร้างการไหลปั่นป่วนทรงกรวยมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน การจัดวางแหวนทรงกรวยแบบลู่เข้า (CR) มีค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 141% - 355% ในทางกลับกันสำหรับการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบบานออก (DR) ให้ค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 171% - 521% ขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลดส์

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใส่แหวนทรงกรวยเข้าไปภายในท่อกลมมีผลในการสร้างความปั่นป่วนให้แก่การไหล และยังทำให้ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีการใส่กรวยเข้าไปภายใน แต่ขณะเดียวกันความเสียดทานยังคงสูงมากตาม งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะลดความเสียดทานจากการไหลผ่านกรวยโดยการดัดแปลงเป็นกรวยวงรี อีกทั้งยังตัดปลายกรวยให้เอียง ซึ่งคาดหวังว่ากรวยวงรีจะสร้างการไหลหมุนวนตามแนวยาว และช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น

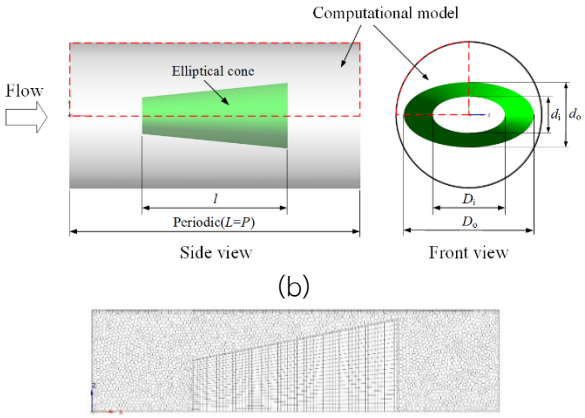
2. โครงสร้างการไหลและสมการที่เกี่ยวข้อง

2.1. กรวยวงรีและการจัดวาง

แบบจำลองที่ทำการศึกษาเป็นท่อกลมที่มีการใส่ตัวสร้างการไหลหมุนวนกรวยวงรี โดยท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน D=50 mm กรวยวงรีมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า $D_{Ri}=D_i/D=0.5$ และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก $D_{Ro}=D_o/D=0.9$ มีอัตราส่วนความรี $E_l=d_i/D_i=d_o/D_o=0.5$ และที่อัตราส่วนระยะพิตช์ $P_R=P/D=1.5$, 2.0 และ 2.5 ตามลำดับ โดยพิจารณาการไหลแบบ periodic ซึ่งกรวยวงรี (ยังไม่มีการดัดแปลง) และกรวยแบบดั้งเดิม มีความยาวกรวย $l=D$ และปลายกรวยมีทิศทางชี้ทวนกระแสการไหล ดังแสดงในรูปที่ 1



(a)



(b)

(c)

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

2.2. สมมติฐานและสมการในการคำนวณ

ในการศึกษาใช้วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (FVM) ด้วยแบบจำลองการไหล 3 มิติที่มีการไหลแบบปั่นป่วน เป็นการไหลแบบคงตัวและไร้การอัดตัว ในช่วงเลขเรย์โนลดส์ 3000 - 20,000 โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ไม่คำนึงแรงวัตถุและการสูญสลายเนื่องจากความหนืด ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-ε พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน ทำการศึกษาการไหลในท่อกลม ที่มีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนที่ผนังท่อคงที่ โดยใส่ตัวสร้างการไหลหมุนวนกรวยวงรี ลักษณะการติดตั้งแสดงดังรูปที่ 1 สำหรับการไหลในท่อกลมสมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน สามารถแสดงในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังนี้

สมการความต่อเนื่อง:

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

สมการโมเมนตัม:

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

สมการพลังงาน:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left((\Gamma + \Gamma_t)\frac{\partial T}{\partial x_j}\right) \qquad (3)$$

เมื่อ Γ และ Γ_t คือ การแพร่ทางความร้อนและการแพร่ทางความร้อนแบบปั่นป่วนตามลำดับ

$$\Gamma = \frac{\mu}{\Pr} \text{ และ } \Gamma_t = \frac{\mu_t}{\Pr_t} \qquad (4)$$

สมการควบคุมทั้งหมดจะทำการคำนวณหาผลเฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องโดยแบบแผนวิธี SIMPLE ในการลู่เข้าหาคำตอบจะพิจารณาที่ความแตกต่างของค่าการแปรเปลี่ยนน้อยกว่า 10^{-5} ของทุกตัวแปร ยกเว้นสมการพลังใช้ค่าการแปรเปลี่ยนน้อยกว่า 10^{-9}

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ เลขเรย์โนลดส์ ตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซิลท์ และสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งค่าเลขเรย์โนลดส์นิยามโดย

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

เมื่อ $\bar{V}$ และ ν คือความเร็วเฉลี่ย และความหนืดจลน์ของอากาศ ตามลำดับ

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

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

การถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปเลขนัสเซิลท์ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

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

สมรรถนะเชิงความร้อน, TEF

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

เมื่อ Nu_0 และ f_0 คือ เลขนัสเซิลท์และตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ ตามลำดับ

2.3. เงื่อนไขขอบเขต

ขอบเขตของการศึกษาได้ทำการพิจารณาทางเข้าและทางออกเป็นแบบ periodic translation สมมติอากาศที่ 300 K ไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ รูปร่างความเร็วทางเข้าและทางออกเหมือนกัน คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศคงที่โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ย

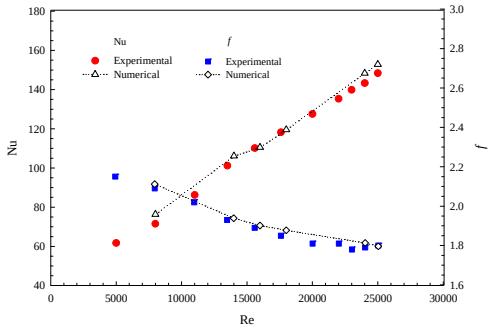
ทางเข้า เงื่อนไขขอบเขตไม่ลื่นไถลที่ผนัง หรือความเร็วที่ผนังมีค่าเป็นศูนย์ ผนังท่ออยู่กับที่ กำหนดให้ผนังของท่อกลมมีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ 600 W/m^2 และให้กรวยวงรีเป็นฉนวน (ความร้อนไม่สามารถผ่านได้)

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

3. ผลการคำนวณและการอภิปราย

3.1. การตรวจสอบผลการคำนวณเชิงตัวเลข

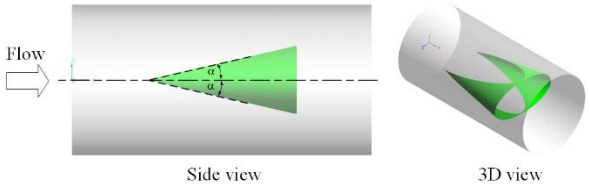
การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณเชิงตัวเลขได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองของ Promvonge [4] ที่เงื่อนไขเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นกรณีของท่อกลมที่ใส่กรวยแบบลู่เข้า(CR) จากผลการตรวจสอบพบว่า ผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และยังพบว่าค่าเลขนัสเซิลท์มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 7.4% และให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของตัวประกอบเสียดทานอยู่ที่ 7.6%



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu และ f กับค่า Re

3.2. กรวยวงรีและกรวยวงรีดัดแปลง

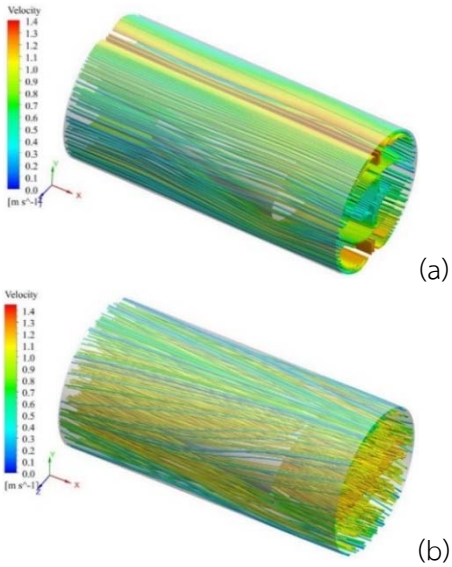
จากการศึกษาได้ใส่กรวยวงรีภายในท่อกลม 2 แบบ คือ กรวยวงรี และกรวยวงรีที่ดัดแปลง โดยกรวยวงรีทั้ง 2 มีค่า D_{Ri}=0.5, D_{Ro}=0.9 ที่มีอัตราส่วนความรี E_l=0.5 กรวยวงรีมีค่า P_R หนึ่งค่า คือ P_R=2 ส่วนกรวยวงรีดัดแปลงได้ทำการตัดมุมที่ปลายกรวยหนึ่งมุมคือ α= 12.82° ซึ่งเป็นมุมน้อยสุดที่กรวยจะไม่ขาดออกจากกัน มีอัตราส่วนระยะพิตช์ 3 ค่า คือ P_R=1.5, 2 และ 2.5 ตามลำดับ โดยกรวยวงรีดัดแปลงได้แสดงในรูปที่ 3



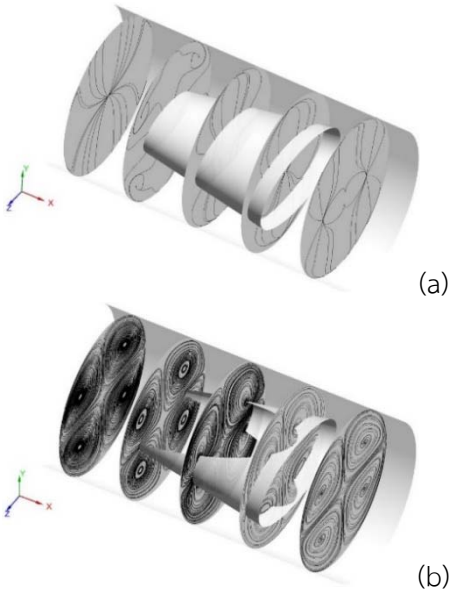
รูปที่ 3 กรวยวงรีดัดแปลงที่ α=12.82°

3.3. พฤติกรรมการไหล

ลักษณะของการไหลในท่อกลมที่ใส่กรวยวงรีที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า D_{Ri}=0.5 และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก D_{Ro}=0.9 อัตราส่วนความรี (E_l=0.5) และที่อัตราส่วนระยะพิตช์ P_R=1.5, 2 และ 2.5 ตามลำดับ และวิเคราะห์ที่ค่า Re=3000 – 20,000 จากรูปที่ 4 (a) แสดงโครงสร้างการไหลของอากาศภายในท่อที่มีการติดตั้งกรวยวงรีและกรวยวงรีดัดแปลง โดยจัดวางกรวยวงรีแบบปลายกรวยชี้ทวนกระแสการไหล พบว่าเมื่ออากาศไหลผ่านท่อที่มีการติดตั้งกรวยวงรี กระแสการไหลค่อนข้างราบเรียบ ดังรูป 5 (a) แต่มีบางส่วนจะถูกบีบให้แคบลงระหว่างบริเวณผนังด้านข้างท่อกับผนังกรวย ทำให้อากาศไหลกระทบที่ผนังด้านข้าง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การใส่กรวยวงรี ยังทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทาน จึงทำการการดัดแปลงตัดปลายกรวยวงรีที่ α=12.82° ดังรูปที่ 4 (b) แสดงให้เห็นว่าการใส่กรวยวงรีดัดแปลงช่วยเพิ่มการปั่นป่วนของกระแสการไหลและเกิดการไหลหมุนวนตามแนวยาว เมื่อเปรียบเทียบกับกรวยวงรี จากรูปที่ 5 (b) แสดงเส้นกระแสการไหลที่ระนาบตัดขวางต่างๆ พบว่ากรวยวงรีดัดแปลงเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนวนคู่ 2 คู่ เมื่อพิจารณาที่ผนังท่อด้านข้าง คู่กระแสการไหลหมุนวนมีทิศพุ่งเข้าสู่ผนัง (common flow down vortices) เกิดการไหลกระแทกที่บริเวณผนังด้านข้าง ทำให้ชั้นขอบเขตความร้อนที่ผนังท่อบางลง ส่งผลให้เกิดแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่าท่อเปล่าและท่อที่มีกรวยวงรี



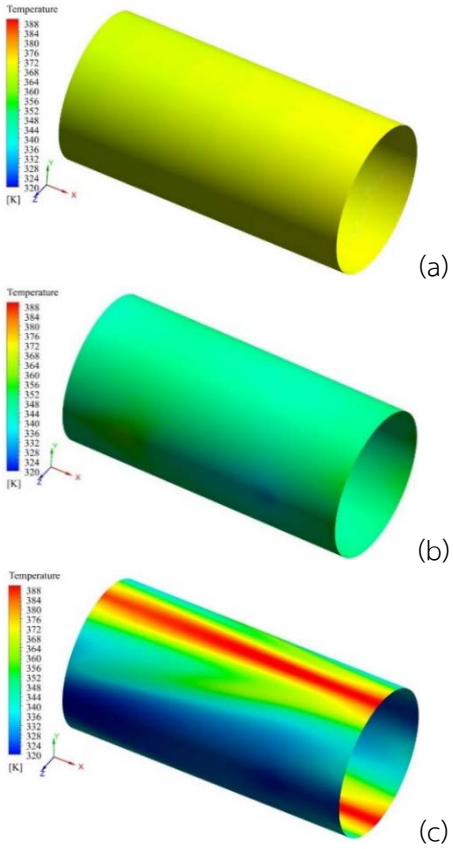
รูปที่ 4 กระแสการไหลในท่อที่มี (a) กรวยวงรี และ (b) กรวยวงรีดัดแปลง



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

3.4. พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

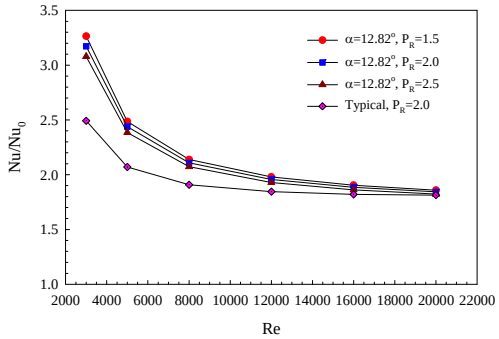
การกระจายอุณหภูมิที่ผิวท่อ ดังแสดงในรูปที่ 6 สำหรับกรณี 6 (a) แสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่ผิวท่อสำหรับกรณีท่อเปล่าผิวเรียบ พบว่าท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีการใส่กรวยวงรี เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังท่อไม่ดี โดยสังเกตที่ผิวท่อยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ และเมื่อทำการติดตั้งกรวยวงรี ดังรูปที่ 6 (b) จะเห็นได้ว่าเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังท่อ ทำให้ผนังท่อมีอุณหภูมิลดลงแต่ยังไม่มากนัก ยังมีบางบริเวณที่ยังแลกเปลี่ยนอุณหภูมิได้น้อย จึงได้ทำการดัดแปลงมุมกรวยที่ α=12.82° เพื่อช่วยให้การกระจายการลดอุณหภูมิมีบริเวณมากขึ้น จะเห็นได้ในรูปที่ 6 (c) จะพบว่ามีการถ่ายเถความร้อนได้ดีบริเวณผนังด้านข้าง เนื่องจากกระแสการไหลหมุนวนกระแทกที่ด้านข้างจะเห็นได้จากอุณหภมิที่ลดต่ำลง จะเห็นสีฟ้าไล่ไปจนเป็นสีน้ำเงิน แต่การถ่ายเถความร้อนบริเวณผิวท่อด้านบน และด้านล่างยังไม่ดีพอ จะเห็นได้จากบริเวณที่มีสีแดง



รูปที่ 6 คอนทัวร์อุณหภูมิบนผนังท่อ (a) ท่อเปล่า (b) ใส่กรวยวงรี และ (c) ใส่กรวยวงรีดัดแปลง α=12.82° ที่ P_R=2, Re=3000

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลดส์ของท่อกลมที่มีการติดตั้งกรวยวงรีและกรวยวงรีดัดแปลง จากการศึกษาผลที่ได้พบว่าเมื่อลดอัตราส่วนระยะพิตซ์ มีผลทำให้เลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จากกราฟพบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ของ P_R =1.5, 2. และ 2.5 ที่พิจารณาในช่วงเลขเรย์โนลดส์ 3000 – 20,000 ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์อยู่ในช่วง 1.82– 3.08 โดยที่ P_R=1.5 และ Re=3000 ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์สูงที่สุด 3.08 เท่า

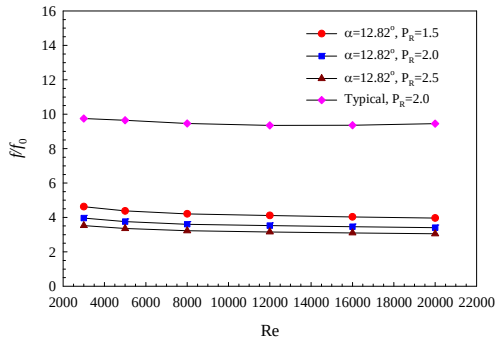
เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีการติดตั้งกรวยวงรีภายใน ขณะเดียวกันกรณีกรวยวงรีดัดแปลงให้ค่า Nu/Nu_0 มากกว่ากรวยวงรีเดิมที่ P_R เดียวกัน



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu/Nu_0 กับ Re สำหรับกรวยวงรี และกรวยวงรีดัดแปลง

3.5 การสูญเสียความดัน

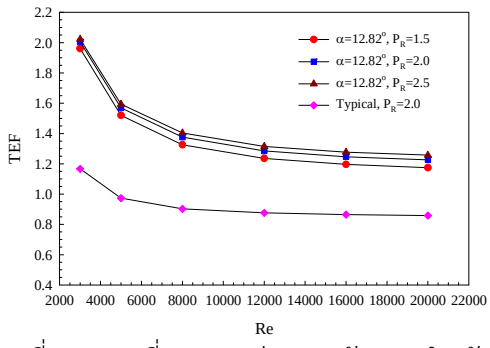
สำหรับค่าความดันสูญเสียหรือค่าความดันตกคร่อมแสดงในรูปของอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทาน พบว่ากรวยวงรีให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงกว่ากรวยวงรีดัดแปลงมุมทุกๆ ค่า P_R และพบว่าเมื่อทำการดัดแปลงมุมกรวยที่ α=12.82° ช่วยลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ในขณะที่ P_R มากขึ้นค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลง ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 8 โดยที่ค่า D_i =0.5, D_o=0.9 และ El=0.5 ขณะที่ P_R = 1.5 ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุด 4.62 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ แต่เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนระยะพิตซ์จึงช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน จึงเป็นเหตุผลให้ทำการดัดแปลงกรวยวงรีที่ α=12.82° ถ้าเปรียบเทียบกับกรวยวงรีเดิม กรวยวงรีดัดแปลงจะสามารถลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลงได้มากกว่า ขณะเดียวกันกรณีกรวยวงรีดัดแปลงให้ค่า f/f_0 น้อยกรวยวงรีเดิมที่ P_R เดียวกันถึง 5 เท่า



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงค่า f/f_0 กับ Re สำหรับกรวยวงรี และกรวยวงรีดัดแปลง

3.6 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลดส์ของท่อกลมที่มีการติดตั้งกรวยวงรีและกรวยวงรีดัดแปลง ที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์ที่ทางเข้า D_{Ri}=0.5 และทางออกที่ D_{Ro}=0.9 โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิตซ์ที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ P_R=1.5, 2 และ 2.5 พบว่าที่ P_R=2.5 ที่อัตราส่วนความรี El=0.5, Re=3000 – 20,000 พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่ามากที่สุดถึง 2.02 เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของกรวยวงรีจะมีค่าน้อยกว่ากรวยวงรีดัดแปลงที่ P_R เดียวกัน



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงค่า TEF กับ Re สำหรับกรวยวงรี และกรวยวงรีดัดแปลง

4. สรุปผลการคำนวณ

จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อทรงกลมที่มีการติดตั้งกรวยวงรีและกรวยวงรีดัดแปลง โดยกำหนดอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง D_{Ri} =0.5 ที่ D_{Ro}=0.9, El =0.5 พิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิตซ์ P_R =1.5, 2, 2.5 พบว่าเมื่อใส่เมื่อใส่กรวยวงรี จะทำให้อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าน้อย ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการดัดแปลงกรวยวงรี เพื่อลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน โดยดัดแปลงกรวยวงรีที่ α=12.82° จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการดัดแปลงกรวยวงรีทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้นโดยที่ D_{Ri}=0.5, D_{Ro}=0.9, E_l=0.5, P_R=2.5 ที่ Re=3000 ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ 2.02 และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์พบว่าที่ D_{Ri}=0.5, D_{Ro}=0.9, E_l=0.5, P_R=1.5 ที่ Re=3000 ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์สูงที่สุดที่ 3.08 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Patankar, S.V., Liu, C.H. and Sparrow, E.M. (1977). Fully developed flow and heat transfer in ducts having streamwise–periodic variations of cross-sectional area, *ASME J. HeatTransfer*, vol. 99(2), May 01, pp. 180–186.

[2] Muthusamy, C., Vivar, M., Skryabin, I. and Srithar, K. (2013). Effect of conical cut-out turbulators with internal fins in a circular tube on heat transfer and friction factor, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 44, May 2013, pp. 64–68.

[3] Yakut, K., Sahin, B., and Canbazoglu, S. (2004). Flow induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers, *Applied Energy*, vol. 78, July 2004, pp. 273–288.

[4] Promvonge, P. (2008). Heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts, *Energy Conversion and Management*, vol.49, January 2008, pp. 8–15

[5] Eiamsa-ard, S. (2010). Experimental investigation of heat transfer and turbulent flow friction in a tube fitted with perforated conical-ring, *International Communications in Heat and Mass Transfer,* vol.37, May 2010, pp. 560 -567

[6] Anvari, A.R., Lotfi, R., Rashidi, A.M., and Sattari, S. (2011), Experimental research on heat transfer of water in tubes with conical ring inserts in transient regime, *International Communications in Heat and Mass Transfer,* vol.38, May 2011, pp. 668–671.