

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อกลมที่ใส่แหวนรูปกรวย

NUMERICAL HEAT TRANSFER STUDY IN A CIRCULAR TUBE WITH  
CONICAL RING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-030-020

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อกลมที่ใส่แหวนรูปกรวย

NUMERICAL HEAT TRANSFER STUDY IN A CIRCULAR TUBE WITH  
CONICAL RING



T144076



ประกายดาว เงินวัน  
PRAGUYDAO NGOENWAN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 144076  
วันเดือนปี 25 ต.ค. 2559

.b.00267042  
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2559  
KMITL-2016-EN-M-030-020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL HEAT TRANSFER STUDY IN A CIRCULAR TUBE WITH  
CONICAL RING



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

KMITL-2016-EN-M-030-020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MON GKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อกลมที่ใส่แหวนรูปกรวย  
Thesis Title Numerical Heat Transfer Study in a Circular Tube with Conical Ring  
นักศึกษา นางสาวประกายดาว เงินวัน  
รหัสประจำตัว 56601139  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงค์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-030-020

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ |                    | ลายมือชื่อ               |
|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| ผศ.ดร.วิฑาดา             | เจษฎารัตนชัย       | วิฑาดา เจษฎารัตนชัย      |
| ผศ.ดร.สมชาย              | ศรัทธาพัฒนาพิพัฒน์ | สมชาย ศรัทธาพัฒนาพิพัฒน์ |
| ดร.มธุรส                 | สุชาตะวัฒน์        | มธุรส สุชาตะวัฒน์        |
| รศ.ดร.พงษ์เจต            | พรหมวงค์           | พงษ์เจต พรหมวงค์         |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวย |
| นักศึกษา                    | นางสาวประกายดาว เงินวัน                                      |
| รหัสนักศึกษา                | 56601139   |
| ปริญญา                      | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต                                       |
| สาขาวิชา                    | วิศวกรรมเครื่องกล  |
| พ.ศ.                        | 2559   |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์                                       |

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม ANSYS (FLUENT) ในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนสามมิติ ที่มีลักษณะการไหลแบบข้ำเป็นช่วงๆ ที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์แล้วจากการติดตั้งแหวนทรงกรวยในท่อกลมที่มีลักษณะกรวยแบบบานออก (diverging conical ring, DR) โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ซึ่งพิจารณาที่อัตราการไหลในพจน์ของเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 3000 ถึง 20,000 สำหรับแหวนทรงกรวยมีความยาวเท่ากับ 1D การตรวจสอบความถูกต้องได้ทำการเปรียบเทียบกับท่อกลมผิวเรียบที่เงื่อนไขเดียวกันพบว่าระหว่างผลการคำนวณเชิงตัวเลขนี้กับสหสัมพันธ์ของท่อกลมที่ตีพิมพ์แล้วมีความสอดคล้องกันดี การศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนได้นำเสนอในเทอมของอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) และ การสูญเสียความดันในเทอมของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบของแหวนกรวยช่วยให้เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นและยังทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับกรวยแบบดั้งเดิม ในแหวนทรงกรวยแบบต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา พบว่ากรณีกรวยทรงข้าวหลามตัดที่ปรับปรุงจากกรวยแบบดั้งเดิมที่มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าและทางออก  $D_{R,i}=d_i/D=0.7$  และ  $D_{R,o}=d_o/D=0.99$  ตามลำดับ มีมุมตัดเอียงทางเข้าและทางออกแหวนทรงกรวย  $\alpha_1=33.5^\circ$  และ  $\alpha_2=60^\circ$  ตามลำดับ ค่าอัตราส่วนระยะพิตช์  $P_R=L/D=1.5$  และค่าเลขเรย์โนลด์  $Re=3000$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดและยังให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal enhancement factor, TEF) พบว่ากรณีกรวยทรงข้าวหลามตัดแบบปรับปรุงที่  $D_{R,i}=d_i/D=0.8$ ,  $D_{R,o}=d_o/D=0.99$ ,  $\alpha_1=33.5^\circ$ ,  $\alpha_2=60^\circ$  และ  $P_R=L/D=2.0$  ที่  $Re=3000$  ให้ค่า TEF สูงที่สุดเท่ากับ 2.20

|                |  |
|----------------|--|
| Thesis Title   | Numerical Heat Transfer Study in a Circular Tube with Conical Ring |
| Student        | Miss. Praguymdao Ngoenwan  |
| Student ID.    | 56601139   |
| Degree         | Master of Engineering  |
| Program        | Mechanical Engineering   |
| Year           | 2016   |
| Thesis Advisor | Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvongse                                  |

### ABSTRACT

The thesis presents a numerical investigation of heat transfer enhancement by a commercial software, ANSYS (FULENT) for calculating a three dimensional turbulent flow in a tube fitted with diverging conical ring, DR. The computation using air as the test fluid is performed for the airflow rate in terms of Reynolds number ranging from 3,000 to 20,000. The numerical results are validated with available measurements and smooth tube's correlations and are in good agreement with the experimental and correlation's data. For the tube inserted with DR elements having a DR length of 1.0D, the heat transfer and pressure drop are displayed in terms of Nusselt number ratio ( $Nu/Nu_0$ ) and friction factor ratio ( $f/f_0$ ). The study reveals that the modified conical rings provide slightly higher heat transfer rate but extremely lower friction factor than the typical conical rings, especially for the modified conical rings in a diamond shape. The maximum heat transfer rate and friction factor is found for the diamond-shaped conical rings with inlet and outlet diameter ratios,  $D_{R,i}=d_i/D=0.7$  and  $D_{R,o}=d_o/D=0.99$  at  $P_R=L/D=1.5$ . However, in terms of optimum thermal enhancement factor (TEF), the maximum TEF of about 2.20 is seen for using the diamond-shaped conical rings with  $D_{R,i}=d_i/D=0.8$ ,  $D_{R,o}=d_o/D=0.99$ , at  $P_R=L/D=2.0$

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาและการให้คำปรึกษาที่มีคุณค่าจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและการดูแลเอาใจใส่ที่ดีในระหว่างการศึกษา ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติม

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ขอขอบคุณ ผศ.ดร.วิฑาตา เจษฎารัตนชัย, คุณพิทักษ์ พร้อมไธสง และ ดร.สมบัติ ทำนา ที่กรุณาให้คำแนะนำที่ดีและความช่วยเหลืออย่างดีแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้าน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้ผู้มีพระคุณทุกท่านซึ่งรวมถึง บิดามารดา ครูอาจารย์ พี่ๆ ที่แล้ปทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ประกายดาว เงินวัน



# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                  | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                               | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                  | III  |
| สารบัญ.....   | IV   |
| สารบัญตาราง.....                                      | VIII |
| สารบัญรูป.....  | IX   |
| รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....                          | XIV  |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                     | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....               | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                      | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....                            | 2    |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....                     | 3    |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....                    | 3    |
| 1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์.....                            | 3    |
| บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....                        | 5    |
| 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                        | 5    |
| 2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง.....           | 5    |
| 2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข..... | 13   |
| 2.2 แนวทางการศึกษาวิจัย.....                          | 14   |
| บทที่ 3 สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....               | 15   |
| 3.1 บทนำ.....   | 15   |
| 3.2 สมมติฐานและสมการในการคำนวณ.....                   | 15   |
| 3.3 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น.....                      | 16   |
| 3.3.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์ของไหล.....          | 16   |
| 3.3.2 การไหลของของไหลที่คิดความหนืด.....              | 17   |
| 3.3.3 การไหลในท่อกลม.....                             | 18   |
| 3.3.4 ตัวประกอบเสียดทาน.....                          | 20   |
| 3.3.5 สภาวะการถ่ายเทความร้อน.....                     | 21   |
| 3.3.6 สภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน.....      | 21   |
| 3.3.7 ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน.....         | 22   |
| 3.4 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน.....         | 22   |
| 3.4.1 วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน.....               | 22   |
| 3.4.2 การพาความร้อน.....                              | 23   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 3.5 การพาความร้อน .....   | 26   |
| 3.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน .....                                   | 26   |
| 3.5.2 สมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อนที่สำคัญ .....                                   | 27   |
| 3.6 การคำนวณการไหลแบบชั่วเป็นช่วง .....   | 27   |
| 3.6.1 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความเร็ว .....  | 27   |
| 3.6.2 การไหลชั่วเป็นช่วงเชิงความร้อน .....  | 28   |
| 3.7 สมการพื้นฐานสำหรับการไหล .....  | 29   |
| 3.7.1 กฎอนุรักษ์มวล .....   | 30   |
| 3.7.2 กฎอนุรักษ์โมเมนตัม .....  | 30   |
| 3.7.3 การไหลแบบปั่นป่วน .....   | 33   |
| บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์และวิธีการทดลอง .....   | 38   |
| 4.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยที่ใช้ในการศึกษา .....  | 38   |
| 4.2 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา .....  | 47   |
| 4.3 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ .....   | 48   |
| 4.4 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม .....   | 48   |
| 4.5 การเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลในท่อกลม .....                           | 50   |
| 4.6 การเปรียบเทียบผลการศึกษาเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง .....                               | 53   |
| 4.7 วิธีการดำเนินการศึกษา .....   | 54   |
| บทที่ 5 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล .....   | 55   |
| 5.1 แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม .....  | 55   |
| 5.1.1 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม .....                               | 56   |
| 5.1.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม .....                             | 57   |
| 5.1.3 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม .....                             | 59   |
| 5.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม .....                           | 60   |
| 5.2 แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 .....  | 61   |
| 5.2.1 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) .....     | 62   |
| 5.2.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) .....   | 64   |
| 5.2.3 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) .....   | 66   |
| 5.2.4 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ..... | 67   |
| 5.2.5 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=27^\circ$ ) .....   | 68   |
| 5.2.6 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=27^\circ$ ) .....   | 69   |
| 5.2.7 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=27^\circ$ ) ..... | 70   |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 5.3 แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 .....   | 71   |
| 5.3.1 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....   | 72   |
| 5.3.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) .....  | 73   |
| 5.3.3 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....   | 75   |
| 5.3.4 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....   | 76   |
| 5.3.5 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=26^\circ$ ) .....  | 77   |
| 5.3.6 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=26^\circ$ ) .....  | 78   |
| 5.3.7 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=26^\circ$ ).....   | 79   |
| 5.4 แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 .....   | 80   |
| 5.4.1 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ ).....   | 81   |
| 5.4.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ ) .....  | 83   |
| 5.4.3 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_1=17^\circ$ ).....   | 85   |
| 5.4.4 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_1=17^\circ$ ).....   | 86   |
| 5.5 แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 .....   | 87   |
| 5.5.1 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4<br>( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ).....     | 88   |
| 5.5.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4<br>( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ) .....  | 91   |
| 5.5.3 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4<br>( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ) .....  | 93   |
| 5.5.4 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4<br>( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ )..... | 94   |
| 5.6 แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 .....   | 95   |
| 5.6.1 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ).....     | 96   |
| 5.6.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ).....   | 99   |
| 5.6.3 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ).....   | 102  |
| 5.6.4 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ )..... | 103  |
| 5.6.5 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ).....                      | 105  |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 5.6.6 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>( $\alpha_1 - \alpha_2 = 33.5^\circ - 60^\circ$ ).....   | 106  |
| 5.6.7 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>( $\alpha_1 - \alpha_2 = 33.5^\circ - 60^\circ$ ).....   | 109  |
| 5.6.8 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>( $\alpha_1 - \alpha_2 = 33.5^\circ - 60^\circ$ )..... | 110  |
| 5.7 อิทธิพลของอัตราส่วนระยะพิตช์.....   | 111  |
| 5.8 การปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยที่เหมาะสม.....  | 114  |
| 5.9 การอภิปรายผลงานวิจัย.....   | 116  |
| บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....  | 118  |
| 6.1 สรุปผลการทดลอง.....   | 118  |
| 6.1.1 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลม.....   | 118  |
| 6.1.2 อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแหวนทรงกรวยที่ทางเข้า.....  | 118  |
| 6.1.3 อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแหวนทรงกรวยที่ทางออก.....   | 119  |
| 6.1.4 อิทธิพลของอัตราส่วนระยะพิตช์.....   | 119  |
| 6.1.5 อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแหวนทรงกรวยที่ทางเข้า.....  | 119  |
| 6.1.6 อิทธิพลของการปรับปรุงแหวนทรงกรวย.....   | 120  |
| 6.2 ข้อเสนอแนะการพัฒนางานวิจัย.....   | 120  |
| เอกสารอ้างอิง.....  | 121  |
| ภาคผนวก.....  | 122  |
| ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ.....  | 123  |
| ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....   | 125  |
| ประวัติผู้เขียน.....  | 136  |

# สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า  |
|----------|---|
| 4.1      | จำนวนของกริดที่ใช้ในการทดสอบ..... 49                            |
| 5.1      | สรุปผลที่ได้จากการศึกษาแหวนทรงกรวยเมื่อใส่ภายในท่อกลม..... 117  |
| ก-1      | คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ..... 124 |



# สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวย a) จัดวางแบบ DR b) จัดวางแบบ CR<br>c) จัดวางแบบ CDR.....                                  | 6    |
| 2.2 แสดงค่า Nusselt number ที่มีการใส่แหวนทรงกรวย.....   | 7    |
| 2.3 แสดงค่า Friction factor ที่มีการสอดใส่แหวนทรงกรวย.....   | 8    |
| 2.4 การจัดวางแหวนทรงกรวยที่มีรูพรุนแบบตามกระแสการไหลหรือ CR.....   | 9    |
| 2.5 ลักษณะของกรวยที่มีการเจาะรู.....   | 9    |
| 2.6 ค่า Nusselt number ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรูพรุน.....   | 10   |
| 2.7 ค่า Friction factor ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรูพรุน.....  | 11   |
| 2.8 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรูพรุน.....  | 12   |
| 2.9 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบ C-Type และ D-Type.....   | 13   |
| 3.1 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลที่ผิวของวัตถุ.....   | 17   |
| 3.2 การไหลภายในท่อกลม.....   | 19   |
| 3.3 แผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์กันระหว่างค่า $f$ และค่า $Re$ .....   | 20   |
| 3.4 การพาความร้อนของการไหลในท่อ.....   | 24   |
| 3.5 รูปทรงเรขาคณิตที่เข้าเป็นช่วง.....   | 28   |
| 3.6 ปริมาตรควบคุม.....   | 30   |
| 3.7 ค่าความเร็ว $u$ ในการไหลแบบปั่นป่วน.....   | 33   |
| 4.1 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม.....  | 38   |
| 4.2 ท่อกลมที่ใส่แหวนรูปแบบปรับปรุง 1 (ตัดองศาด้านบน).....  | 39   |
| 4.3 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 (รูปตัววีด้านบน).....   | 40   |
| 4.4 ภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 (รูปตัววีด้านบน).....  | 40   |
| 4.5 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 (รูปตัววีด้านหลัง).....   | 41   |
| 4.6 ภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 (รูปตัววีด้านหลัง).....  | 42   |
| 4.7 ภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4.....   | 43   |
| 4.8 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4.....  | 43   |
| 4.9 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด).....   | 44   |
| 4.10 ภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด).....   | 45   |
| 4.11 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด) โดยปรับขนาด<br>เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าและทางออกใหญ่ขึ้น.....  | 46   |
| 4.12 ภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด) โดยปรับขนาด<br>เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าและทางออกใหญ่ขึ้น..... | 46   |
| 4.13 แบบจำลองการตีกริดของท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวย.....   | 48   |
| 4.14 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า $Nu$ ที่ $Re=3,000$ .....   | 49   |
| 4.15 อิทธิพลของจำนวนกริดเซลล์ต่อค่า $f$ ที่ $Re=3,000$ .....   | 50   |

## สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.16 ค่าเลขนีสเซลล์ของการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมผิวเรียบที่ไม่มีกระแสไหลวนทรงกรวย .....  | 51   |
| 4.17 ค่าตัวประกอบความเสียดทานของการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ .....  | 52   |
| 4.18 ค่านีสเซลล์ของการคำนวณเชิงตัวเลขและการทดลอง.....   | 53   |
| 4.19 ค่าตัวประกอบความเสียดทานของการคำนวณเชิงตัวเลขและการทดลอง .....   | 53   |
| 5.1 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม .....  | 55   |
| 5.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมแบบ 3 มิติ .....   | 56   |
| 5.3 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม .....   | 56   |
| 5.4 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมที่แสดงในรูปของ core of vortex.....  | 57   |
| 5.5 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม.....   | 57   |
| 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม .....  | 59   |
| 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม .....  | 60   |
| 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม .....   | 61   |
| 5.9 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....   | 62   |
| 5.10 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....   | 63   |
| 5.11 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....   | 63   |
| 5.12 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ซึ่งแสดงในรูปของ core of vortex .....                              | 64   |
| 5.13 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) .....   | 64   |
| 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลล์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ )..... | 66   |
| 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....                    | 67   |
| 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....                           | 68   |
| 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=27^\circ, 30^\circ$ ).....                | 69   |
| 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ที่มุม ( $\alpha_1=27^\circ, 30^\circ$ ) .....  | 70   |
| 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=27^\circ, 30^\circ$ ).....                 | 71   |
| 5.20 รูปทรงของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....   | 71   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.21 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....  | 72   |
| 5.22 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....  | 72   |
| 5.23 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ที่มุม ( $\alpha_1=30^\circ$ ) โดยแสดงในรูปของ core of vortex.....  | 73   |
| 5.24 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ที่มุม( $\alpha_1=30^\circ$ ) .....  | 73   |
| 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) .....  | 75   |
| 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....   | 76   |
| 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ ).....  | 77   |
| 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=26^\circ, 30^\circ$ ).....   | 78   |
| 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=26^\circ, 30^\circ$ ).....   | 79   |
| 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=26^\circ, 30^\circ$ ).....  | 80   |
| 5.31 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ ).....   | 81   |
| 5.32 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ ).....  | 82   |
| 5.33 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ ) .....   | 82   |
| 5.34 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ ) ซึ่งแสดงในรูปของ core of vortex.....  | 83   |
| 5.35 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ ).....   | 83   |
| 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 และ 3 ( $\alpha_2=17^\circ, \alpha_1=26^\circ$ และ $\alpha_1=30^\circ$ ).....      | 85   |
| 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 และ 3 ( $\alpha_2=17^\circ, \alpha_1=26^\circ$ และ $\alpha_1=30^\circ$ ) ..... | 86   |
| 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 และ 3 ( $\alpha_2=17^\circ, \alpha_1=26^\circ$ และ $\alpha_1=30^\circ$ ).....         | 87   |
| 5.39 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ).....   | 87   |
| 5.40 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ).....   | 88   |
| 5.41 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 (ก) ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) และ (ข) ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ).....            | 89   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.42 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4<br>(ก) ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) และ (ข) ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ).....                       | 90   |
| 5.43 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ซึ่งแสดงในรูปของ core of vortex<br>(ก) ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) และ (ข) ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ )..... | 91   |
| 5.44 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อสอดใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4<br>(ก) ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) และ (ข) ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ).....                 | 92   |
| 5.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง<br>แบบที่ 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ).....                           | 93   |
| 5.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวย<br>แบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ).....                        | 94   |
| 5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบ<br>ปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ).....                               | 95   |
| 5.48 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ).....   | 96   |
| 5.49 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ).....   | 96   |
| 5.50 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>(ก) ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) และ (ข) ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ).....                       | 97   |
| 5.51 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>(ก) ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) และ (ข) ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ).....                       | 98   |
| 5.52 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ซึ่งแสดงในรูปของ core of vortex<br>(ก) ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) และ (ข) ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ )..... | 99   |
| 5.53 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>(ก) ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) และ (ข) ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ).....                    | 100  |
| 5.54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบ<br>ปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ).....                                 | 102  |
| 5.55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวย<br>แบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ).....                        | 103  |
| 5.56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบ<br>ปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ).....                               | 104  |
| 5.57 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ).....   | 105  |
| 5.58 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5<br>( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ).....   | 105  |

## สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.59 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ซึ่งแสดงในรูปของ core of vortex ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) .....             | 106  |
| 5.60 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) .....                                | 106  |
| 5.61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) .....         | 108  |
| 5.62 ค่าเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) .....                                 | 108  |
| 5.63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ..... | 109  |
| 5.64 ค่าตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) .....                             | 110  |
| 5.65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ..... | 111  |
| 5.66 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่ $D_{R,i}=0.7$ .....                           | 112  |
| 5.67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่ $D_{R,i}=0.8$ .....                           | 113  |
| 5.68 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่ $D_{R,i}=0.7$ .....                                   | 113  |
| 5.69 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 $D_{R,i}=0.8$ .....                                       | 114  |
| 5.70 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่ $D_{R,i}=0.7$ .....                                  | 115  |
| 5.71 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่ $D_{R,i}=0.8$ .....                                  | 115  |

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

|           |  |
|-----------|--|
| $A$       | พื้นที่การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพา, $m^2$          |
| $A_c$     | พื้นที่หน้าตัดของท่อ, $m^2$                            |
| $A_s$     | พื้นที่ผิวท่อทั้งหมด, $m^2$                            |
| $D_{R,i}$ | อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า, $(d_i/D)$           |
| $D_{R,o}$ | อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก, $(d_o/D)$            |
| $l$       | ความยาวแหวนทรงกรวย, m                                  |
| $C_f$     | สัมประสิทธิ์ความเสียดทานแผ่นนิ่ง                       |
| $c_p$     | ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, $J/kg \cdot K$ |
| $D$       | เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อกลม, m                  |
| $L$       | ความยาวของท่อ, m                                       |
| $f$       | ตัวประกอบเสียดทาน                                      |
| $f_0$     | ตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ                        |
| $h$       | สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$             |
| $i$       | พลังงานภายใน, $J/kg$                                   |
| $J$       | ฟลักซ์ของมวล, $kg/m^2 s$                               |
| $E$       | พลังงานรวม, J  |
| $K$       | พลังงานจลน์ของกระแสการไหลเฉลี่ยต่อหน่วยมวล, $J/kg$     |
| $k$       | พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนต่อหน่วยมวล, $J/kg$          |
| $k_a$     | ค่าการนำความร้อนของอากาศ, $W/m \cdot K$                |
| $M$       | อัตราการไหลเชิงมวล, $kg/s$                             |
| $Nu$      | เลขนิตเชลต์เฉลี่ย                                      |
| $Nu_0$    | เลขนิตเชลต์ของท่อกลมผิวเรียบ                           |
| $P$       | เส้นรอบรูป, m  |
| $p$       | ความดันสถิต, Pa  |
| $P_R$     | อัตราส่วนระยะพิตช์                                     |
| $Pr$      | เลขพรานด์  |
| $q_s''$   | ฟลักซ์ความร้อนระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ, $W/m^2$ |
| $Re$      | เลขเรย์โนลด์   |
| $S_{ij}$  | เทนเซอร์ค่าเฉลี่ยของอัตราความเครียด, $s^{-1}$          |
| $T$       | อุณหภูมิ, K  |

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

|        |  |
|--------|--|
| $T_0$  | อุณหภูมิเฉลี่ย, K                      |
| $T_s$  | อุณหภูมิผิว, K                         |
| $TEF$  | ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน     |
| $t$    | เวลา, s                                |
| $U_i$  | ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน $x_i$ , m/s     |
| $u_i$  | ความเร็วย่อยในแนวแกน $x_i$ , m/s       |
| $u'_i$ | ความเร็วย่อยผันแปรในแนวแกน $x_i$ , m/s |
| $V$    | ความเร็วเฉลี่ย, m/s                    |
| $X$    | ระยะในหนึ่งช่วงครีป, m                 |
| $x$    | พิกัดบอกทิศทางการไหล                   |
| $y^+$  | ระยะไร้นิวทั้นที่วัดจากผนัง            |

### สัญลักษณ์กรีก

|               |   |
|---------------|---|
| $\Phi$        | ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติใดๆ ของของไหล          |
| $\Omega$      | เทนเซอร์ค่าเฉลี่ยของอัตราการหมุน, $s^{-1}$  |
| $\Gamma$      | การแพร่ทางความร้อน                          |
| $\alpha$      | องศา  |
| $\phi$        | ค่าคุณสมบัติใดๆ ต่อหน่วยมวล                 |
| $\lambda$     | ความหนืดที่สอง                              |
| $\mu$         | ความหนืดสัมบูรณ์, $N \cdot s / m^2$         |
| $\varepsilon$ | อัตราการสูญเสียของความปั่นป่วน, $m^2 / s^3$ |
| $\omega$      | อัตราการสูญเสียจำเพาะ, $s^{-1}$             |
| $\rho$        | ความหนาแน่น, $kg / m^3$                     |
| $\tau$        | ความเค้นเฉือน, $N / m^2$                    |

### ตัวห้อย

|       |                                |
|-------|--------------------------------|
| 0     | ท่อผิวเรียบ (smooth tube)      |
| a     | อากาศ (air)                    |
| m     | เฉลี่ย (mean)                  |
| w     | ผนัง (wall)                    |
| $R_i$ | อัตราส่วนทางเข้า (inlet ratio) |
| $R_o$ | อัตราส่วนทางออก (outlet ratio) |
| 1     | ด้านหน้า (font)                |
| 2     | ด้านหลัง (back)                |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันโลกมีความต้องการพลังงานมากขึ้นทั้งในด้านการผลิตอุปกรณ์ การขนส่ง และโดยเฉพาะภาคอุตสาหกรรมเพื่อพัฒนาและเพิ่มศักยภาพของ วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องจักรต่างๆ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านความร้อน การมีระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีจะส่งผลอย่างมากต่อการประหยัดพลังงาน เมื่อนำเอาความร้อนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิต ดังนั้นการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง

การพาความร้อนโดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบมีให้เห็นในชีวิตประจำวันของเราอย่างเช่น เครื่องปรับอากาศ เครื่องจักรกล ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ล้วนต้องอาศัยกระบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาทั้งสิ้น โดยทั่วไปวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Heat convection) สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลักๆ คือ 1) วิธีที่ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกในการช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (passive technique) คือ การเพิ่มพื้นที่ผิวหรือเพิ่มการติดตั้งการสร้างความปั่นป่วนเข้าไปภายในท่อเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำและเกิดความปั่นป่วนของการไหลมากขึ้นช่วยให้สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มพื้นที่ผิวภายในท่อยังทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในท่อด้วยเช่นกัน 2) วิธีที่ต้องการพลังงานจากภายนอกเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (active technique) คือ การนำอุปกรณ์ภายนอกมาช่วยทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของไหลภายในท่อ เช่น อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้า เมื่อของไหลเกิดการสั่นสะเทือนมากขึ้น จึงสามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ ในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้วิธี passive technique เนื่องจากต้นทุนในการผลิตต่ำและสามารถปรับเปลี่ยนและพัฒนาได้หลากหลายรูปแบบ โดยวิธี passive technique ที่น่าสนใจวิธีหนึ่ง คือ การเพิ่มตัวสร้างความปั่นป่วนรูปทรงต่างๆ เพื่อเป็นตัวเหนี่ยวนำการไหลและสร้างการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อทดสอบ

อย่างไรก็ตามวิธีการ passive technique ช่วยให้เราสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้นแต่ก็ยังทำให้ค่าความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการเลือกใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงสมรรถนะหรือประสิทธิภาพเพื่อให้สามารถนำมาใช้ได้อย่างเกิดประโยชน์สูงสุดซึ่งคุ้มค่ากับการลงทุนและประโยชน์ในทางเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

เนื่องจากการเลือกตัวสร้างความปั่นป่วนที่จะใส่ภายในท่อเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งสำคัญจึงต้องพิจารณาทั้ง รูปทรง ขนาด องศา และพารามิเตอร์อื่นๆ ที่จะมีผลกับการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทาน เพื่อให้การศึกษาสามารถหาค่าที่ได้เหมาะสม นอกจากนี้แล้วยังต้องคำนึงถึงขีดจำกัดในการทดลองไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาซึ่งจำเป็นต้องคำนึงถึงหลายส่วนด้วยกัน ดังนั้นจึงได้นำวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาใช้ในการศึกษาเพื่อเพิ่มความถูกต้อง แม่นยำ และเพื่อช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการศึกษาด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมกรวยไหลที่มีลักษณะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติ และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยโดยจัดวางแหวนทรงกรวยในท่อกลมแบบลู่ออก ซึ่งได้กำหนดผนังท่อที่มีความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ การจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม FLUENT ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมอื่นๆ ได้อีกด้วย วัตถุประสงค์หลักๆของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

- 1.2.1 เพื่อศึกษางานวิจัยโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ซึ่งทำการศึกษาแหวนทรงกรวยที่ใส่ภายในท่อกลม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของพฤติกรรมกรวยไหล การถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อมและสมรรถนะเชิงความร้อนของการไหลภายในท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของพฤติกรรมกรวยไหล การถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อมและสมรรถนะเชิงความร้อนของของไหลภายในท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวย โดยปรับปรุงแหวนทรงกรวยในแบบต่างๆกัน
- 1.2.4 เพื่อพัฒนาและปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบต่างๆ เพื่อนำไปสู่การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน, ลดค่าตัวประกอบเสียดทาน และเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงขึ้น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ทำการศึกษาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) โดยศึกษาการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในรูปของเลขนิจเซลล์และค่าตัวประกอบเสียดทาน
- 1.3.2 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ
- 1.3.3 ศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนอยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ ตั้งแต่ 3,000 ถึง 20,000
- 1.3.4 ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable  $k-\epsilon$
- 1.3.5 การคู่ควบของความเร็วและความดันใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE
- 1.3.6 เทอมของการพาใช้การคำนวณแบบ QUICK
- 1.3.7 พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection)
- 1.3.8 ทำการวิจัยเฉพาะท่อกลมที่มีการให้ความร้อนที่ผนังแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่
- 1.3.9 กำหนดให้แหวนทรงกรวยที่ใช้ในการวิเคราะห์ไม่สามารถนำความร้อนได้
- 1.3.10 ทำการศึกษาแหวนทรงกรวยที่ใส่ภายในท่อกลมที่อัตราส่วนระยะพิตซ์  $P_R=2.0$ , อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า  $D_{R,i}=0.6$ , อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกเป็น  $D_{R,o}=0.9, 0.95, 0.97$  โดยพิจารณาแหวนทรงกรวยแบบมาตรฐานและแบบปรับปรุงรูปแบบของแหวนทรงกรวยแบบต่างๆ และทำการศึกษาแหวนทรงกรวยที่ใส่ภายในท่อกลมที่อัตราส่วนระยะพิตซ์  $P_R=1.5, 2, 2.5$  อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า  $D_{R,i}=0.7$  และ  $0.8$  อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R,o}=0.97, 0.98$  และ  $0.99$  โดยปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบรูปทรงข้าวหลามตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.11 ทารูปทรงของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่เหมาะสมทั้ง ขนาด ระยะพิตซ์ องศา เพื่อเปรียบเทียบค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุดจากการศึกษาครั้งนี้
- 1.3.12 หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องซึ่งนำไปสู่การใช้งานจริง

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ทำการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลที่ใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลม
- 1.4.2 กำหนดลักษณะรูปร่างของแหวนทรงกรวยโดยอ้างอิงขนาดและรูปแบบพื้นฐานจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาและสร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหลพร้อมกับเลือกขนาดและจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสม
- 1.4.3 ทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยการเก็บผลเปรียบเทียบกับผลการทดลองของนักวิจัยในอดีตที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยภายในท่อกลม
- 1.4.4 คำนวณเชิงตัวเลขจากแบบจำลองการไหลสามมิติ โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่  $Re$ ,  $P_R$ ,  $D_{R,i}$ ,  $D_{R,o}$  และ องศา โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบลู่ออก
- 1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณโดยเปรียบเทียบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ด้วยการสร้างกราฟเปรียบเทียบ
- 1.4.6 สรุปผลการวิจัยและให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

- 1.5.1 ได้ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบเพิ่มตัวสร้างความปั่นป่วนภายในท่อกลมแบบแหวนทรงกรวยตัด
- 1.5.2 ได้เรียนรู้ถึงอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบมาตรฐานและแบบปรับปรุงแหวนทรงกรวย
- 1.5.3 เพื่อการพัฒนาและออกแบบแหวนทรงกรวยที่ใส่ภายในท่อกลมให้มีความเหมาะสม และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้สูงสุด
- 1.5.4 เป็นแนวทางเพื่อการวิจัยด้านการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยตัดต่อไป
- 1.5.5 เพื่อประหยัดพลังงานและนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต
- 1.5.6 เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

#### 1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้ได้นำเสนอรายละเอียดของแต่ละหัวข้อเป็น บทที่ โดยประกอบด้วยบทต่างๆ ดังนี้ บทที่ 1 เป็นการกล่าวนำเพื่อให้เข้าใจถึงที่มาของการวิจัย ขอบเขตของการศึกษา รูปแบบของการศึกษา ขั้นตอนการศึกษา และประโยชน์ที่ผู้ทำวิจัยคาดหวังว่าจะได้รับจากการทำการศึกษา งานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 ได้เขียนกล่าวนำเสนองานวิจัยต่างๆที่ผ่านมาที่ได้ทำการศึกษาการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลม โดยมีรูปแบบการจัดวางแหวนทรงกรวยในแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความดันตกคร่อม สมรรถนะเชิงความร้อน เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและทำความเข้าใจในการวิจัยครั้งนี้

บทที่ 4 อธิบายรูปแบบการศึกษาโดยการใส่แหวนทรงกรวยแบบมาตรฐานในท่อกลมและรูปแบบการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่ใส่ในท่อกลมแบบต่างๆ โดยปรับเปลี่ยนค่าเลขเรย์โนลด์  $Re$ , อัตราส่วนระยะพิทช์  $P_R$ , อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า  $D_{R,i}$ , อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R,o}$  และ องศาที่ทำการตัดแหวนทรงกรวย เพื่อลดปัญหาค่าตัวประกอบเสียดทานที่สูงขึ้น และรายละเอียดของขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 5 นำเสนอผลที่ได้จากการศึกษาทั้งค่าตัวประกอบเสียดทาน ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน เมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมทั้งแบบมาตรฐานและแบบปรับปรุงเป็นรูปทรงต่างๆ และสุดท้ายคือ

บทที่ 6 ได้สรุปผลจากการศึกษาทั้งหมดและข้อเสนอแนะต่างๆ เพิ่มเติมจะรวบรวมไว้ในบทนี้



## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทรรศน์

ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยการเพิ่มตัวสร้างความปั่นป่วนหรือเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนโดยการใส่แหวนทรงกรวยในแบบต่างๆ เพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ซึ่งได้ทำการศึกษาทั้งการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เพื่อศึกษาพฤติกรรมกรวยไหล พฤติกรรมกรวยถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนการถ่ายเทความร้อน เพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษาและเป็นแนวทางในการนำไปวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมต่อไป

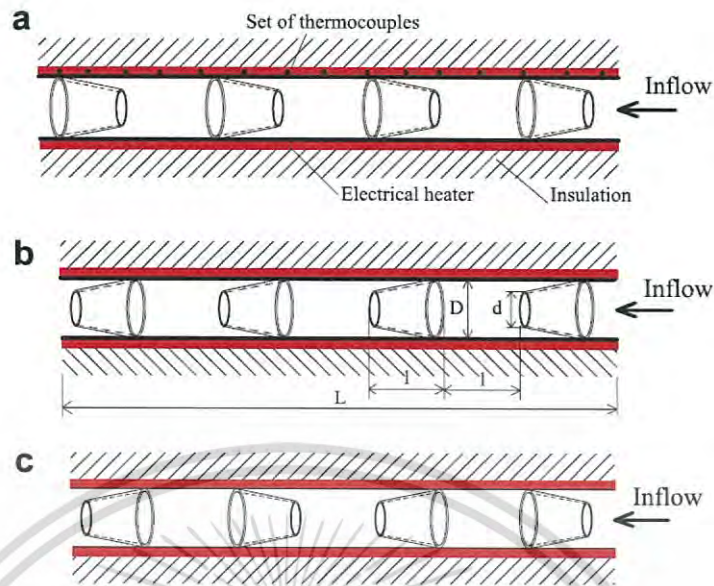
#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือเครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องมือที่สำคัญมากอย่างหนึ่งเพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่างๆ ทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้องคำนึงถึงหน้าที่หลักของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างถูกหลักการและมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการศึกษารูปแบบการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยภายในโดยติดตั้งที่ศูนย์กลางของท่อเพื่อสร้างกระแสการไหลแบบหมุนวนและช่วยในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาวิจัยในอดีตที่ผ่านมาเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาและปรับปรุงแหวนทรงกรวยดังนี้

##### 2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

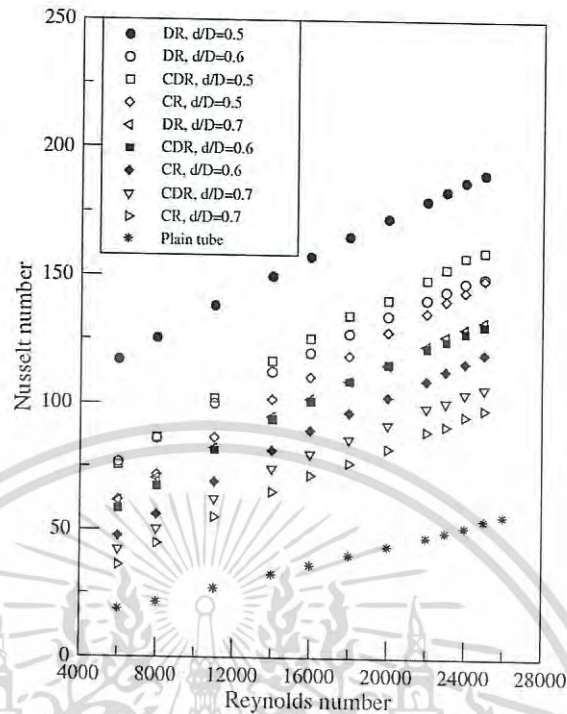
Yakut and Sahin (2004) ได้ทำการศึกษาผลเมื่อติดตั้งชุดสร้างความปั่นป่วนแบบทรงกรวยต่อการถ่ายเทความร้อน ความดันตกคร่อมและการศึกษาช่วงการเกิดการไหลที่มีการหน่วงอันเนื่องมาจากการสั่นของการไหล จากการศึกษาพบว่า การติดตั้งชุดสร้างความปั่นป่วนแบบทรงกรวยสามารถสร้างกสสนสั้นของของไหล

Promvong (2008) ได้ศึกษาพฤติกรรมกรวยถ่ายเทความร้อนในท่อกลมกับการใส่แหวนทรงกรวยภายใน จากการทดลองพบว่าแหวนทรงกรวยมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและปัจจัยแรงเสียดทาน การจัดวางแหวนทรงกรวยส่งผลให้ค่าอัตรากรวยถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น โดยเฉพาะการจัดวางแบบ CR, DR และ CDR ทำให้ค่า Nusselt Number เพิ่มขึ้นถึง 197%, 333% และ 237% ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวย a) จัดวางแบบ DR b) จัดวางแบบ CR c) จัดวางแบบ CDR Promvonge (2008)

จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นลักษณะการจัดวางของแหวนทรงกรวยที่ได้ทำการทดลองโดยการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลม ซึ่งจัดวางแหวนทรงกรวยที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ โดยแบบ DR เป็นการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบบานออก ซึ่งจะเห็นขนาดแหวนด้านที่มีขนาดเล็กสวนทางกับกระแสการไหล รูปแบบการจัดวางแบบ CR เป็นการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบลู่เข้า ซึ่งจะเห็นขนาดแหวนด้านที่มีขนาดเล็กตามกระแสการไหล โดยขนาดแหวนด้านใหญ่กว่าจะหันทวนกระแสการไหล รูปแบบการจัดวางแบบ CDR เป็นการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบบานออกและลู่เข้า โดยสลับการจัดวาง ซึ่งจุดเริ่มต้นจะจัดวางแหวนทรงกรวยแบบบานออกคือให้ขนาดแหวนด้านเล็กหันทวนกระแสการไหล และจุดถัดไปจะมีการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบลู่เข้าโดยหันแหวนด้านเล็กตามกระแสการไหล ซึ่งจากรูปที่ 2.1 จะมีลูกศรชี้ทิศทางการไหลของกระแสโดยชี้บอกว่าเป็นกระแสไหลเข้า หรือ “inflow”

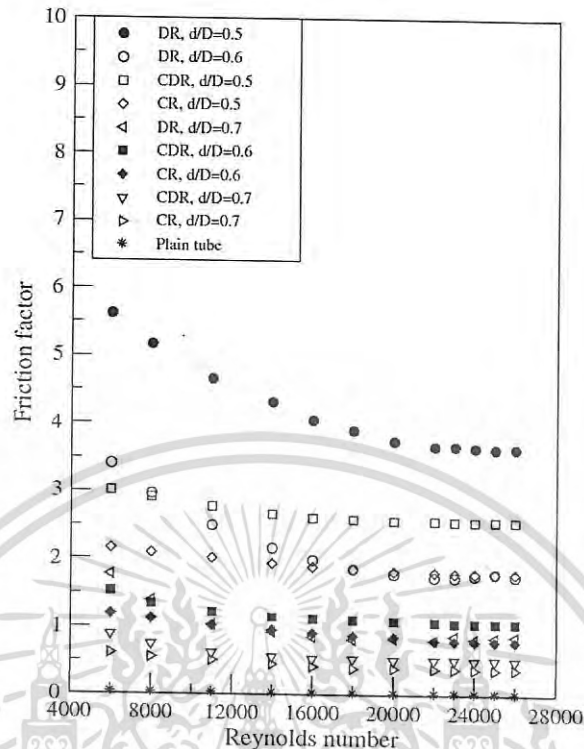


รูปที่ 2.2 ค่า Nusselt number ที่มีการใส่แหวนทรงกรวย Promvonge (2008)

จากรูปที่ 2.2 เป็นกราฟแสดงให้เห็นค่า Nusselt number ที่มีการใส่แหวนทรงกรวยที่ขนาดแตกต่างกันโดย  $d/D=0.5$ ,  $0.6$  และ  $0.7$  โดยเปรียบเทียบการจัดวางแหวนทรงกรวยทั้ง DR, CR และ CDR จากกราฟแสดงให้เห็นว่าขนาด  $d/D=0.5$  ให้ค่า Nusselt number สูงที่สุดเมื่อจัดวางแหวนทรงกรวยแบบ DR และลดลงมาเป็นขนาด  $d/D=0.6$  โดยจัดวางแบบ DR เช่นเดียวกัน

จากรูปจะเห็นได้ว่าขนาด  $d/D=0.7$  โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบ CR จะให้ค่า Nusselt number ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการจัดวางแบบอื่นๆ จากกราฟเมื่อเรียงลำดับจากค่า Nusselt number จากค่าสูงไปต่ำจะสามารถจัดเรียงได้ดังนี้ DR- $d/D=0.5$ , DR- $d/D=0.6$ , CDR- $d/D=0.5$ , CR- $d/D=0.5$ , DR- $d/D=0.7$ , CDR- $d/D=0.6$ , CR- $d/D=0.6$ , CDR- $d/D=0.7$  และ CR- $d/D=0.7$  ตามลำดับ จากผลการศึกษานี้ชี้ชัดว่าการจัดวางแบบแหวนทรงกรวยแบบ DR หรือการหันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยที่มีขนาดเล็กทวนกระแสการไหลของของไหลในท่อกลมช่วยให้เพิ่มค่า Nusselt number ให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการจัดวางแบบอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการของการไหลที่  $d/D=0.5$ ,  $0.6$  และ  $0.7$  จะให้ค่า Nusselt number ลดลงตามลำดับ

จากรูปเมื่อเทียบค่า Nusselt number ที่มีการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเราใส่แหวนรูปกรวยเข้าไปภายในท่อกลมไม่ว่าจะจัดวางแหวนทรงกรวยแบบ CR, DR หรือ CDR ก็สามารถช่วยเพิ่มค่า Nusselt number ได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีกรวยภายใน



รูปที่ 2.3 ค่า Friction factor ที่มีการใส่แหวนทรงกรวย Promvonge (2008)

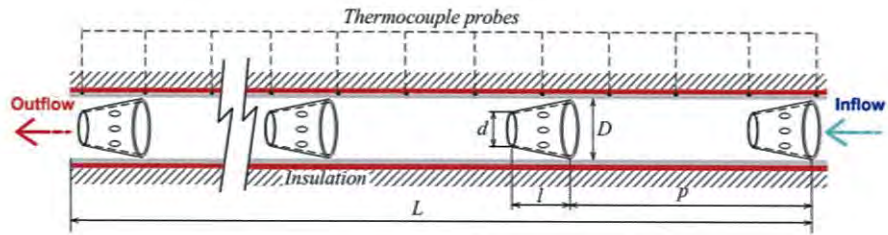
จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นค่า Friction factor ที่มีการใส่แหวนทรงกรวยที่จัดวางแหวนทรงกรวยแบบ CR, DR และ CDR โดยพิจารณาที่  $d/D=0.5, 0.6$  และ  $0.7$  เมื่อพิจารณาที่อัตราการขวางการไหลจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่า  $d/D$  ให้มีค่าสูงขึ้นจะช่วยลดค่า Friction factor ได้เมื่อเทียบกับค่า  $d/D$  ต่ำๆ จากกราฟเมื่อพิจารณาทั้งรูปแบบการจัดวางแหวนทรงกรวยและอัตราการขวางการไหล โดยไล่จากค่า Friction factor ที่มีค่าสูงไปยังค่าต่ำ จะได้ค่าดังนี้ DR-d/D=0.5, DR-d/D=0.6, CDR-d/D=0.5, CR-d/D=0.5, DR-d/D=0.7, CDR-d/D=0.6, CR-d/D=0.6, CDR-d/D=0.7 และ CR-d/D=0.7 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบค่า Nusselt number กับค่า Friction factor จากรูปที่ 2.2 และ 2.3 พบว่าเมื่อเราใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมสามารถเพิ่มค่า Nusselt number และยังส่งผลให้ค่า Friction factor มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยอัตราการขวางการไหลและการจัดวางแหวนทรงกรวยที่ให้ค่า Nusselt number ที่สูงขึ้นก็จะให้ค่า Friction factor ที่สูงขึ้นตามไปด้วยเป็นลำดับ

Kongkaipaiboon et al. (2010) ได้ศึกษาเชิงการทดลองของการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทานการไหลในท่อที่ติดตั้งกรวยพุน โดยศึกษาที่อัตราส่วนระยะพิทท์ ( $PR=4, 6$  และ  $12$ ) และจำนวนรูพุนที่ต่างกันที่ ( $N=4, 6$  และ  $8$  รู) ทำการศึกษาที่ค่าเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่  $4000-20000$  โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ พบว่าการใส่ Conical ring มีผลช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น และ จำนวนรูพุนของกรวยก็ส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของท่อด้วยเช่นกัน โดยการใส่กรวยพุนเข้าไปภายในท่อ สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ถึง  $137\%$  เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

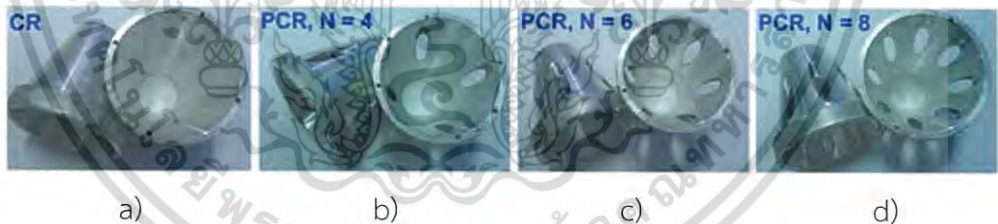
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวเรียบที่ไม่มีการใส่แหวนทรงกรวย และทำให้สมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นประมาณ 0.92 ที่  $PR=4$  และ  $N=8$  ที่ค่าเรโนลด์เท่ากับ 4000



รูปที่ 2.4 การจัดวางแหวนทรงกรวยที่มีรูพรุนแบบตามกระแสการไหลหรือ CR  
Kongkaipaiboon et al. (2010)

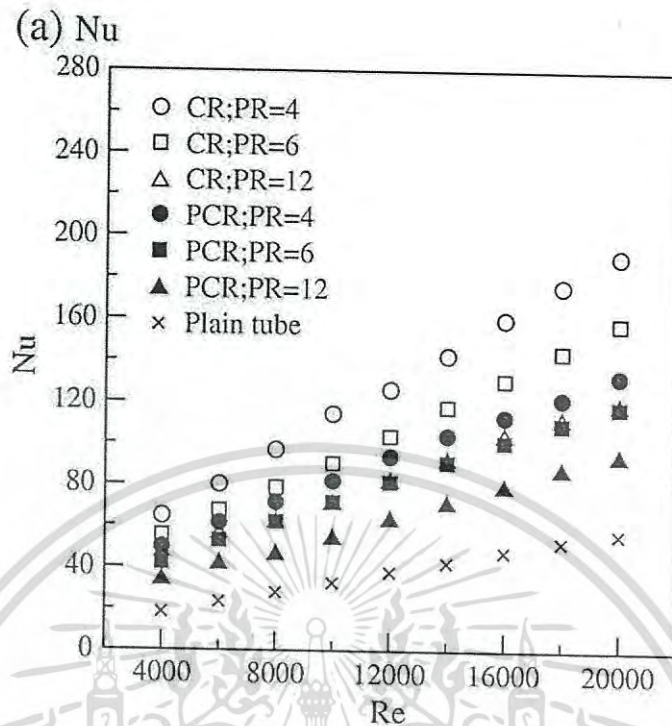
รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงทิศทางการไหลของของไหลและการจัดวางแหวนทรงกรวยที่ใช้ในการทดลอง โดยจากภาพจะเห็นว่าการทดลองนี้จะทดลองโดยจัดวางแหวนรูปกรวยแบบ CR หรือให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแหวนทรงกรวยที่มีขนาดเล็กขึ้นตามกระแสการไหล โดยทิศทางการไหลจะไหลจากกระแสไหลเข้า ไปยังกระแสไหลออกหรือ “inflow” ไปยัง “outflow” โดยระยะพิทช์หรือระยะที่กรวยอันแรกห่างจากกรวยอันที่สองเป็น 4, 6 และ 12 หรือมีค่าเท่ากับ 248 มิลลิเมตร, 372 มิลลิเมตร และ 744 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่า  $L$  คือค่าความยาวท่อที่ใช้ทดลอง โดยค่าทดลองนี้ใช้ค่าความยาวท่อ  $L=1500$  มิลลิเมตร และค่า  $D$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยโดยกำหนดให้ค่า  $D=62$  มิลลิเมตร และกรวยมีความหนา 1.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.5 ลักษณะของกรวยที่มีการเจาะรู Kongkaipaiboon et al. (2010)

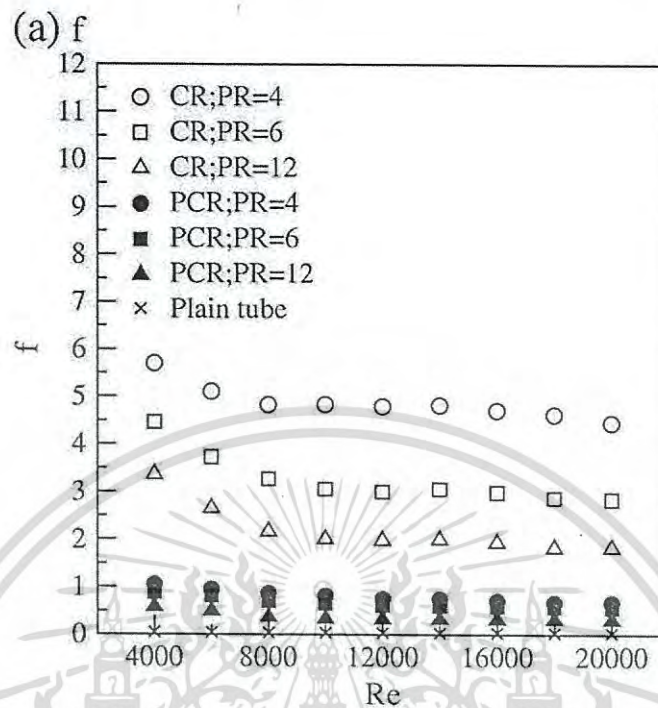
ภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะของกรวยที่มีการเจาะรู โดยการจัดวางแบบ CR แบบแรกไม่ได้มีการเจาะรู และทำการทดสอบต่อไปโดยกำหนดค่า  $N$  หรือจำนวนรูเจาะที่กรวยเป็น  $N=4, 6$  และ  $8$  ตามลำดับ จากภาพรูปที่ 5 a) แสดงรูปแบบกรวยที่ไม่มีการเจาะรู b) แสดงลักษณะกรวยที่มีการเจาะรูของกรวยจำนวน  $N=4$  รูป c) แสดงลักษณะกรวยที่มีการเจาะรูของกรวยจำนวน  $N=6$  d) แสดงลักษณะกรวยที่มีการเจาะรูของกรวยจำนวน  $N=8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



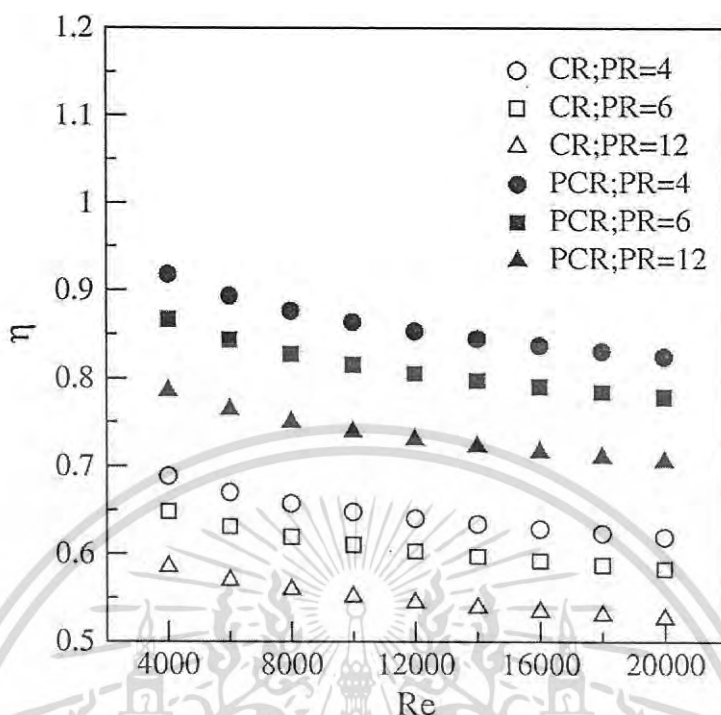
รูปที่ 2.6 ค่า Nusselt number ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรูพรุน  
Kongkaipaiboon et al. (2010)

จากรูปที่ 2.6 กราฟแสดงค่า Nusselt number ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรูพรุน แสดงให้เห็นว่ากรวยที่ไม่มีการเจาะรูให้ค่า Nusselt number สูงกว่าแหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรูพรุน และที่ค่าระยะพิตช์หรือระยะห่างของการจัดวางกรวยสั้นจะให้ค่า Nusselt number สูงกว่าที่ระยะพิตช์ยาว จากกราฟจึงสามารถเรียงลำดับค่า Nusselt number ที่มีค่าสูงไปยังค่า Nusselt number ที่มีค่าต่ำได้ดังนี้ CR-PR=4, CR-PR=6, CR-PR=12, PCR:N4-PR=4, PCR:N6-PR=6, PCR:N8-PR=12 ตามลำดับ จากกราฟเมื่อเปรียบเทียบการใส่แหวนทรงกรวยกับท่อเปล่าผิวเรียบ ไม่ว่าจะเป็กรวยที่เจาะรูหรือไม่ได้ทำการเจาะรู ค่า Nusselt number ที่ได้ก็สูงกว่าค่า Nusselt number ของท่อเปล่าผิวเรียบ ดังนั้นจึงชี้ให้เห็นว่าการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อสามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ โดยจากการทดลองนี้พบว่าเมื่อทำการเจาะรูของกรวยจะทำให้ค่า Nusselt number ลดลงหรืออธิบายง่าย ๆ คืออัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงนั่นเอง



รูปที่ 2.7 ค่า Friction factor ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรูพรุน  
Kongkaipaiboon et al. (2010)

จากรูปที่ 2.7 กราฟแสดงค่า Friction factor ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่เจาะรูพรุน จะเห็นได้ว่าจำนวนการเจาะรูของกรวยมีผลทำให้ค่า Friction factor ลดลง จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อเจาะรูของกรวยเพิ่มขึ้นค่าของ Friction factor ก็จะลดลง และที่ค่าระยะพิตช์หรือระยะห่างของการจัดวางกรวยสั้นจะให้ค่า Friction factor สูงกว่าที่ระยะพิตช์ยาว จากกราฟจึงสามารถเรียงลำดับค่า Friction factor ที่มีค่าสูงไปยังค่า Friction factor ที่มีค่าต่ำได้ดังนี้ CR-PR=4, CR-PR=6, CR-PR=12, PCR:N4-PR=4, PCR:N6-PR=6, PCR:N8-PR=12 ตามลำดับ จากกราฟเมื่อเทียบการใส่แหวนทรงกรวยกับท่อเปล่าผิวเรียบ ไม่ว่าจะเป็กรวยที่เจาะรูพรุนหรือไม่ได้ทำการเจาะรู ค่า Friction factor ที่ได้ก็สูงกว่าค่า Friction factor ของท่อเปล่าผิวเรียบ ดังนั้นจึงชี้ให้เห็นว่าการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อเป็นเหตุให้ค่า Friction factor เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อทำการเจาะรูของกรวยเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยลดค่า Friction factor ได้



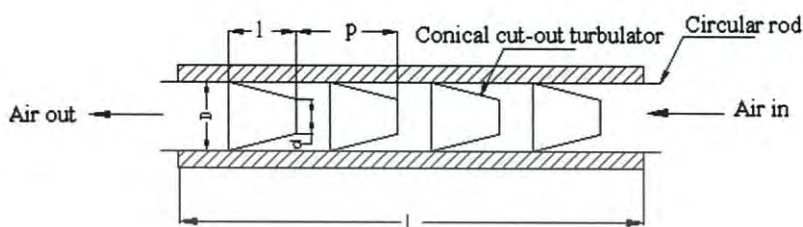
รูปที่ 2.8 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรูพรุน Kongkaipaiboon et al. (2010)

จากรูปที่ 2.8 กราฟแสดงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวยที่มีการเจาะรูพรุน จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเจาะรูของกรวยทำให้สมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยจากกราฟสามารถเรียงลำดับของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจากมากไปน้อยได้ดังนี้ PCR:N4-PR=4, PCR:N6-PR=6, PCR:N8-PR=12, CR-PR=4, CR-PR=6, CR-PR=12 ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.6 และ 2.7 จึงเห็นได้ว่าการเจาะรูของกรวยอาจช่วยเพิ่มค่า Nusselt number ได้ไม่มากเท่ากับกรวยที่ไม่ได้เจาะรูพรุน แต่การเจาะรูพรุนสามารถช่วยลดค่า Friction factor ได้ยิ่งเจาะรูมากค่า Friction factor ที่เกิดขึ้นก็จะน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อมาเปรียบเทียบค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจึงเห็นได้ชัดว่า การเจาะรูของกรวยเพื่อช่วยลดค่า Friction factor มีผลต่อเนื่องทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้นด้วย โดยที่ระยะพิทซ์ 4 มิลลิเมตร และจำนวนรูเจาะ N=4 ให้ค่าสูงสุด

Anvari et al. (2011) ได้ทำการวิจัยเชิงทดลองเกี่ยวกับการถ่ายโอนความร้อนของน้ำในท่อ กับแหวนทรงกรวยแทรกภายใน พบว่าตัวสร้างความปั่นป่วนทรงกรวยยังมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอีกด้วยโดย การจัดวางแบบ DR มีค่า Nusselt Number เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 141% ถึง 355% ขึ้นอยู่กับค่า Reynolds number ในทางกลับกันสำหรับการจัดวางแบบ DR ให้ค่า Nusselt Number เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 171% ถึง 521% ขึ้นอยู่กับค่า Reynolds

Muthusamy et al. (2013) ซึ่งศึกษาผลของอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนทรงกรวยต่อการถ่ายเทความร้อนและปัจจัยความเสียดทาน จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใส่ตัวสร้างความปั่นป่วนทรงกรวยภายในท่อกลมช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นโดยทำการจัดวางแหวนทรงกรวย 2 แบบคือ D-Type และ C-Type ซึ่งลักษณะการจัดวางเป็นดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบ C-Type และ D-Type  
Muthusamy et al. (2013)

จากการทดลองของ Muthusamy และคณะ ซึ่งให้เห็นว่าการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบ C-Type ช่วยเพิ่มค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นมากกว่าการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบ D-Type โดยการศึกษาครั้งนี้ได้เปรียบเทียบระยะพิตช์ที่ PR=3, 4 และ 5 เมื่อเปรียบเทียบระยะพิตช์ที่แตกต่างกันพบว่า ที่ระยะพิตช์ PR=3 ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับระยะพิตช์อื่นๆ

### 2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเชิงตัวเลข

Patankar et al. (1977) เป็นผู้ริเริ่มศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์การไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อ โดยจากการศึกษาพบว่า การไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์มีพฤติกรรมการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกันและซ้ำกันทุกๆ โมดูล

## 2.2 แนวทางการศึกษาวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ส่วนใหญ่สามารถสรุปได้ว่าการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมสามารถสร้างความปั่นป่วนแก่การไหลได้ และเมื่อติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนแบบแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมยังสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้อีกด้วยโดยการจัดวางแหวนทรงกรวยแบบชี้ทวนกระแสการไหลให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการจัดวางแหวนทรงกรวยในแบบอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมยังทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนการถ่ายเทความร้อนที่ได้มีค่าต่ำ ดังนั้นด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นสาเหตุหลักในการศึกษางานวิจัยต่อไปโดยทำการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลม และทำการปรับปรุงรูปแบบแหวนทรงกรวยเพื่อเป็นการลดค่าตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่เราต้องการศึกษา ซึ่งการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาการเจาะรูแหวนทรงกรวยยังไม่สามารถลดค่าตัวประกอบเสียดทานได้มากเท่าที่ควร แต่จากการศึกษาการปรับระยะพิตซ์มีผลต่อค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบโดยปรับปรุงแหวนทรงกรวยโดยเน้นที่การปรับเปลี่ยน ระยะพิตซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าของแหวนทรงกรวย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกของแหวนทรงกรวย และทำการตัดองศาของแหวนทรงกรวยเพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทานและเพื่อเพิ่มการกระจายการไหลและการถ่ายเทความร้อนของของไหลให้เพิ่มมากขึ้น และทำการศึกษาโดยปรับพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าของแหวนทรงกรวย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกของแหวนทรงกรวย ระยะพิตซ์ และองศา เพื่อให้ได้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนการถ่ายเทความร้อนของของไหลสูงที่สุด เพื่อให้เป็นการขยายข้อมูลในการศึกษาท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวยและเพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้ใช้งานในการตัดสินใจเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม เป็นประโยชน์ในเชิงการเพิ่มองค์ความรู้ใหม่และเป็นข้อมูลเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีต่อไปในอนาคตสำหรับผู้สนใจ ออกแบบ ปรับปรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการเพิ่มการติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนให้แก่กระแสการไหลหรือการเพิ่มพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน เพื่อนำไปสู่การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดการสูญเสียให้น้อยที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์ไม่มากนักน้อยแก่ผู้ที่สนใจ และแก่อุตสาหกรรม ทำให้มีการใช้พลังงานและทรัพยากรอย่างคุ้มค่า มีสมรรถนะเชิงความร้อน สามารถลดต้นทุนในการผลิตในด้านอุตสาหกรรม ซึ่งจะเป็นประโยชน์โดยตรงในเชิงเศรษฐกิจ สังคม และ สิ่งแวดล้อม

## บทที่ 3

# สมการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยเน้นพิจารณาที่การถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลม ค่าความดันตกคร่อม ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของของไหล และวิเคราะห์ปัญหาของการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมหรือไฟไนต์วอลุ่ม ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับกันมากในปัจจุบัน โดยสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาการไหลผ่านรูปทรงที่มีความซับซ้อนได้และมีความแม่นยำ

### 3.2 สมมติฐานและสมการในการคำนวณ

จากการวิจัยได้ศึกษาโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (finite volume method) โดยมีสมมติฐานในการศึกษา ดังนี้

- (1) ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ
- (2) เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้
- (2) แบบจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
- (3) เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์และเข้าเป็นช่วง
- (4) คุณสมบัติต่างๆ ของของไหลมีค่าคงที่
- (5) ไม่คำนึงแรงวัตถุและการสูญเสียเนื่องจากความหนืด
- (6) ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน
- (7) ให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังท่อ

สำหรับการไหลในท่อกลมสมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน สามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

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

สมการโมเมนตัม

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

## สมการพลังงาน

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

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

สมการควบคุมทั้งหมดจะทำการคำนวณหาผลเฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องโดยแผนผังวิธีแบบ SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) ในการลู่เข้าหาคำตอบจะพิจารณาที่ความแตกต่างของค่าการแปรเปลี่ยนน้อยกว่า  $10^{-5}$  ของทุกตัวแปร

### 3.3 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น

กลศาสตร์ของไหล มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อชีวิตประจำวัน รวมถึงในทางอุตสาหกรรมด้วย เครื่องอำนวยความสะดวก เครื่องจักรต่างๆ และกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมนั้น ก็จะประกอบไปด้วยของไหลแทบทั้งสิ้น เช่น เครื่องปรับอากาศ ระบบน้ำ เป็นต้น ดังนั้นพื้นฐานความรู้ในวิชา กลศาสตร์ของไหลจึงมีความจำเป็นสำหรับการคำนวณการออกแบบระบบเพื่อให้มีการนำไปใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรม

#### 3.3.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์ของไหล

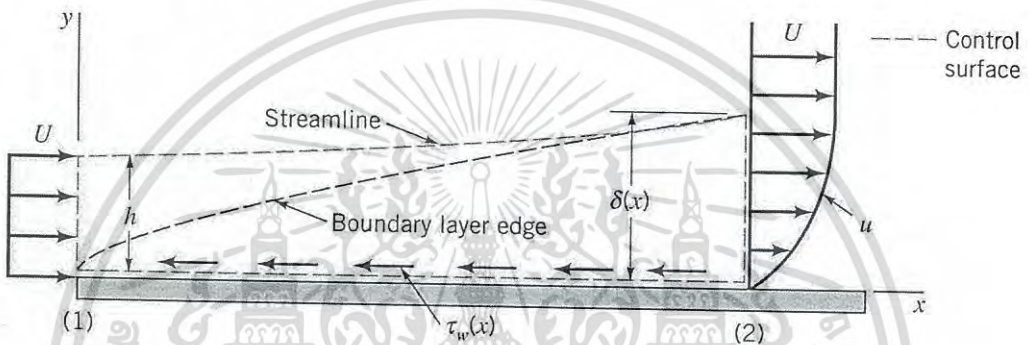
ของไหล (fluid) คือของเหลว และก๊าซ ในการวิเคราะห์จะต่างกันตรงที่ก๊าซจะเป็นของไหลที่สามารถอัดตัวได้ ส่วนของเหลวนั้นไม่สามารถอัดตัวได้ ถึงแม้จะอัดตัวได้บ้าง แต่ต้องใช้ความดันสูงมาก จึงพิจารณาว่าของเหลวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ของไหลอัดตัวได้ คือของไหลที่ความหนาแน่นไม่คงที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ก๊าซอยู่ในภาชนะปิดสนิทเมื่อได้รับความร้อน ความหนาแน่นของก๊าซก็จะเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามถ้าสูญเสียความร้อน ความหนาแน่นก็จะลดลง ซึ่งในที่นี่จะกล่าวเฉพาะของไหลที่อัดตัวไม่ได้เท่านั้น

- 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

3.3.2 การไหลของของไหลที่คิดความหนืด

3.3.2.1 การไหลแบบราบเรียบ หรือการไหลเป็นชั้นๆ (laminar flow) กับการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow)

ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อของไหลซึ่งมีความหนืดไหลไปตามผิวของวัตถุ ความหนืดของของไหลจะทำให้อนุภาคเล็กๆ ของของไหลยึดติดอยู่กับผิวของวัตถุ โดยมีความเร็ว  $U = 0$  เป็นเหตุให้ของไหลเมื่อยิ่งเข้าใกล้ผิววัตถุมากยิ่งขึ้นจะทำให้เกิดชั้นบางๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลมากยิ่งขึ้น ในชั้นนี้เรียกว่า “ชั้นขอบเขตของความเร็ว (velocity boundary layer)” ส่วนการไหลที่อยู่นอกขอบเขตนี้ไปเรียกว่า “เส้นการไหลหลัก (mainstream)” ซึ่งสามารถจะตัดทิ้งผลกระทบจากความหนืดได้



รูปที่ 3.1 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลที่ผิวของวัตถุ

ชั้นขอบเขตของการไหลนี้จะแบ่งออกเป็นชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) กับ ชั้นขอบเขตของการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) การไหลภายในชั้นขอบเขตการไหลเป็นชั้นนั้นจะมีเส้นของการไหลอย่างเป็นระเบียบเกิดขึ้น และเนื่องมาจากความหนืดที่มีอยู่ในโมเลกุลเล็กๆ ของของไหลจะทำให้เกิดแรงเฉือน (shear)  $\tau$  [Pa] ขึ้นในการไหล โดย

$$\tau = \mu \cdot \frac{dU}{dy} \tag{3.4}$$

ในสมการนี้ค่า  $\mu$  (viscosity) [Pa\*s] เป็นค่าความหนืดของของไหล เป็นค่าที่แสดงถึงการส่งถ่ายปริมาณโมเมนตัมในการไหลอันเนื่องมาจากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของการไหล ขณะเดียวกันการไหลภายในชั้นของขอบเขตการไหลแบบปั่นป่วนนั้น จะไม่มีสมการตายตัว การไหลจะเป็นลักษณะที่ไม่มีระเบียบ (disorder) แรงเฉือนที่เกิดในของไหลจะหาได้จาก

$$\tau = \rho \cdot (\nu + \epsilon_m) \cdot \frac{dU}{dy} \tag{3.5}$$

โดยค่า  $\nu$  คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลนศาสตร์ (kinematic viscosity,  $\mu/\rho$ ) ส่วนค่า  $\epsilon_m$  [m<sup>2</sup>/s] เป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงจลน์อลวน (หรืออาจจะเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเมนต์มวลวน ระดับความหนืดเชิงจลนศาสตร์) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ของการขนถ่าย โมเมนต์มวลวนเนื่องมาจากการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากโดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของการไหล และชนิดของของไหล ในการแยกการไหลว่าจะเป็นการไหลแบบเป็นชั้น (ไหลแบบราบเรียบ) หรือเป็นการไหลแบบปั่นป่วน สามารถแยกได้โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ ที่ไม่มีมิติที่เรียกว่า “ค่าเรย์โนลด์  $Re$  (reynolds number)” เป็นตัวกำหนดในการแยกการไหลโดย

$$Re = (\text{ความเร็วในการไหล}) \times (\text{ความยาว}) / \text{ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลนศาสตร์} \\ = \text{แรงขับเคลื่อนของการไหล} / \text{ความหนืดในการไหล}$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (3.6)$$

ค่าเรย์โนลด์ที่อยู่ในระหว่างเปลี่ยนจากการไหลแบบเป็นชั้นไปสู่การไหลแบบปั่นป่วนนั้นเรียกว่า “ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (critical reynolds)” และสำหรับของไหลที่ประพฤติตามสมการที่ (3.6) จะเรียกว่า “ของไหลนิวโทเนียน (newtonian fluid)” ส่วนของไหลที่ไม่ประพฤติตามจะเรียกว่า “ของไหลที่ไม่ใช่ของไหลนิวโทเนียน (Non-newtonian fluid)” (ยกตัวอย่างเช่น ยาง) เนื่องจากค่าเรย์โนลด์เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างแรงขับเคลื่อนของการไหลต่อความหนืด ดังนั้นจะเห็นว่าถ้าค่าเรย์โนลด์มีค่ามาก ก็สามารถแสดงเป็นเชิงสัมพันธ์ให้เห็นว่าผลกระทบ (effect) ของค่าความหนืดจะมีค่าน้อย

### 3.3.3 การไหลในท่อกลม

การไหลในท่อกลมที่บริเวณทางเข้าท่อที่แสดงในรูปที่ 3.2 นั้นจะเห็นว่าตั้งแต่ที่บริเวณทางเข้าชั้นขอบเขตของความเร็วยังค่อยๆพัฒนาเพิ่มขึ้นที่ละเล็กที่ละน้อย จนถึงระยะทางค่าหนึ่ง ( $L_e$ ) ชั้นของความเร็วยังซ้อนกันทั้งบน และล่าง หลังจากนั้นการกระจายความเร็วจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเรียกว่าการไหลได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์ (fully developed) ค่าเรย์โนลด์  $Re$  สำหรับการไหลภายในท่อนั้นถ้าให้  $V$  เป็นค่าความเร็วเฉลี่ย  $D$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของพื้นที่ตัดขวางท่อแล้วจะได้

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{[\rho / (\pi D^2 / 4)] D}{\mu} \quad (3.7)$$

อนึ่งค่า  $\rho V$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] จะเป็นค่าการไหลของมวลสารต่อพื้นที่หน้าตัดในการไหล สำหรับในกรณีของแก๊สนั้น การเพิ่มความร้อนภายในท่อจะทำให้แก๊สขยายตัวมีความเร็ว  $V$  เพิ่มขึ้น ค่า  $\rho V$  จะไม่เปลี่ยนแปลงถ้าพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สะดวกในการคำนวณ นอกจากนั้นโดยปกติจะถือว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด  $\mu$  จะไม่เปลี่ยนแปลงไปกับความดันอีกด้วย ส่วนค่าความหนืดเชิงจลนศาสตร์  $\nu$  ซึ่งเท่ากับ  $\mu/\rho$  ในกรณีของแก๊สจะเป็นค่าที่ผกผันกับความดันซึ่งจะต้องระมัดระวัง

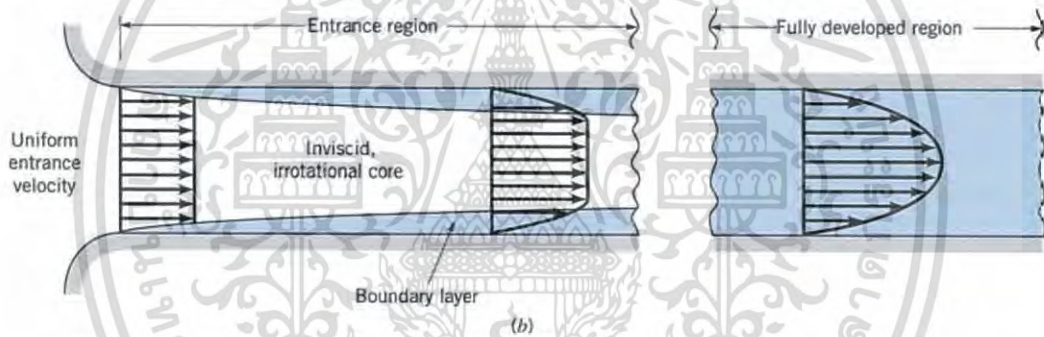
เมื่อ  $D$  คือความยาวบ่งลักษณะของช่องทางไหลหรือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter) มีนิยามเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \frac{4A_c}{P} \quad (3.8)$$

เมื่อค่า  $A_c$  และ  $P$  เป็นพื้นที่หน้าตัดและเส้นรอบรูปของหน้าตัดตามลำดับ โดยทั่วไปสำหรับการไหลในท่อผิวเรียบ เลขเรย์โนลด์สวิกฤติของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลปั่นป่วน เริ่มต้นจากและความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัว

ค่าเรย์โนลด์สวิกฤติ  $Re_c$  ของการไหลภายในท่อที่ได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์แล้ว คือค่าเรย์โนลด์สที่การไหลเปลี่ยนจากการไหลราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่า  $Re_c = 2300$  หรืออยู่ในช่วงระหว่าง 2000 – 4000 โดยประมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนในการไหล ความขรุขระภายในท่อที่ไหล หรือรูปทรง และสภาพของทางเข้า ส่วนค่าเรย์โนลด์สที่ต่ำกว่า 2000 ไม่ว่าท่อจะมีความยาวมากเพียงใด การไหลก็จะไม่เปลี่ยนแปลงไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน จะยังคงรักษาสภาพการไหลแบบเป็นชั้น หรือราบเรียบต่อไป



รูปที่ 3.2 การไหลภายในท่อกลม

รูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นการกระจายความเร็วที่ได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์การกระจายความเร็วจะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

โดยทั่วไปสำหรับการไหลในท่อผิวเรียบ เลขเรย์โนลด์สวิกฤติของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นการไหลปั่นป่วน เริ่มต้นจาก  $Re_D > 4000$  และความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวหาได้จากสมการ

$$\left(\frac{L_c}{D}\right)_{\text{urb}} \approx 4.4 Re_D^{1/6} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทาน (friction factor) ของ Moody หรือ Darcy ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ มีนิยามว่า

$$f_{Darcy} \equiv \frac{(\Delta p / L) D}{\rho u_0^2 / 2} \quad (3.10)$$

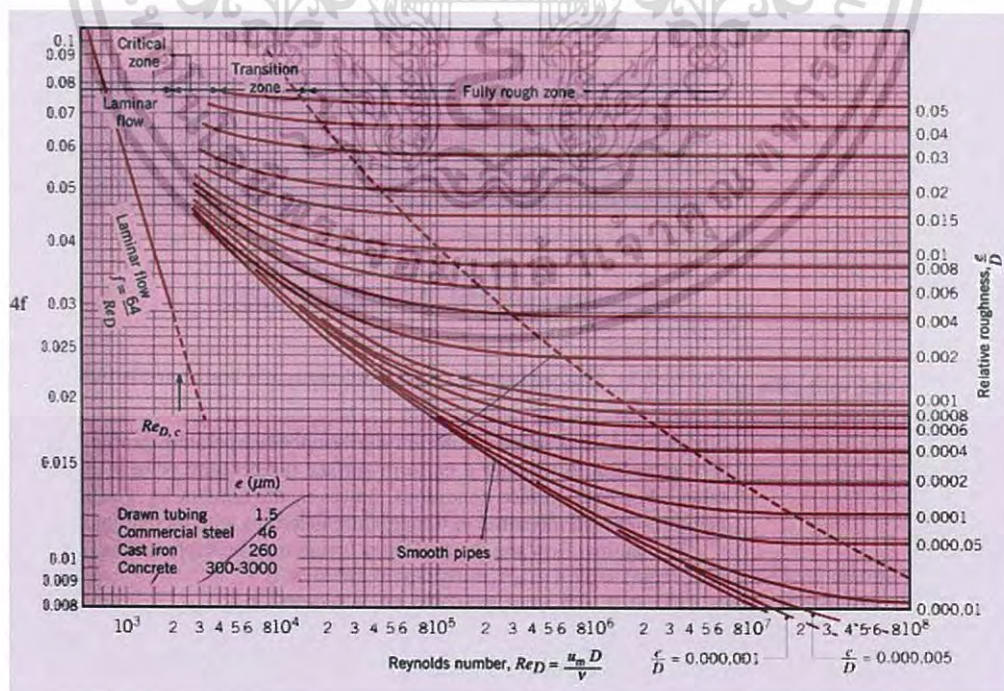
เมื่อค่า  $L$  คือช่วงความยาวที่วัดค่าความดันตกคร่อม และค่า  $f_{Darcy}$  นี้แตกต่างกับค่าตัวประกอบความเสียดทาน  $f$  ซึ่งเรียกว่าตัวประกอบความเสียดทานเพนนิ่ง มีสมการดังนี้

$$f = \frac{f_{Darcy}}{4} \quad (3.11)$$

เมื่อเกิดการไหลภายในท่อ จะเห็นว่าเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ที่จะต้องมียพลังงานจำนวนหนึ่งสูญเสียไป โดยความดันจะลดลง ความดันที่สูญเสีย  $\Delta p$  ไปนี้ สามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$\frac{\Delta p}{\rho} = 0.5KV^2 \quad (3.12)$$

โดยในที่นี้ ค่า  $K$  จะเป็นค่า “สัมประสิทธิ์ของการสูญเสียความดัน”



รูปที่ 3.3 แผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์กันระหว่างค่า  $f$  และค่า  $Re$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\frac{\Delta E_{loss}}{\Delta t} = \frac{\Delta p \cdot M}{\rho} = \Delta p \cdot Q \quad (3.13)$$

### 3.3.5 สภาวะการถ่ายเทความร้อน

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

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

ฟลักซ์ความร้อน ( $q_s''$ ) ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s'' = h(T_s - T_m) \quad (3.14)$$

โดยที่  $T_s$  คืออุณหภูมิพื้นผิว

$T_m$  คืออุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องทางไหล

ฟลักซ์ความร้อนนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่แตกต่างรวมทั้งหมดระหว่างผนังกับของไหล ซึ่ง  $h$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาบางครั้งเรียกว่าการนำผ่านฟิล์ม เพราะความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการนำความร้อนในชั้นบางๆ ของของไหลที่บริเวณผิวของผนัง ค่า  $T_m$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการไหลนั่นคือ  $dT_m / dx$  จะไม่เป็นศูนย์ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ค่าของ  $T_m$  จะเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางการไหล,  $x$  ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนจากผิวสู่ของไหล

### 3.3.6 สภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของของไหลต้องเปลี่ยนแปลงตามระยะ  $x$  ซึ่งสภาวะการปรับตัวอย่างสมบูรณ์แล้วของอุณหภูมิจะไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิ เพื่อให้ได้เงื่อนไขของสภาวะการพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน

เมื่อกำหนดค่าความแตกต่างอุณหภูมิไร้มิติในรูป  $(T_s - T) / (T_s - T_m)$  ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอยู่จริง อัตราส่วนนี้จะเป็นอิสระกับ  $x$  นั่นคือถึงแม้ว่า  $T$  ยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ  $x$  แต่ค่า

ความแตกต่างของอุณหภูมิรัมีตินี้จะไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งการไหลแบบนี้เรียกว่าการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์เชิงความร้อน (thermally fully developed) และจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right] = 0 \quad (3.15)$$

โดยที่  $T$  คืออุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (3.14) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่องทางไหลอาจจะเป็นกรณี  $q_s''$  คงที่หรือ  $T_s$  คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ  $q_s''$  คงที่ ส่วนกรณี  $T_s$  คงที่จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสถานะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

### 3.3.7 ค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน

นำเสนอค่าตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อนหรือค่าสมรรถนะของการเพิ่มขึ้นทางความร้อน,  $TEF$  ซึ่งคำนวณได้จาก

$$TEF = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (3.16)$$

## 3.4 หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน

### 3.4.1 วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน

วิธีการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน แบ่งออกได้เป็น

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

การนำความร้อน หมายถึง กระบวนการที่ความร้อนถ่ายเทโดยอาศัยการเคลื่อนไหวของอะตอมหรือโมเลกุลในของแข็งไปตามลำดับ

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

การแผ่รังสี วัตถุทุกชนิดจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาว และความเข้มค่าหนึ่งจากพื้นผิวอยู่ตลอดเวลา โดยความยาวและความเข้มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน หากวัตถุอื่นดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ ก็จะได้รับพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้เรียกว่า การแผ่รังสี

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน สามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการคงที่ และกระบวนการไม่คงที่ กระบวนการคงที่หมายถึง ในการถ่ายเทความร้อน การกระจายอุณหภูมิภายในตัววัตถุและปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ส่วนในกระบวนการไม่คงที่ ปริมาณเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

### 3.4.2 การพาความร้อน

#### 3.4.2.1 ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน

เมื่อพิจารณาในเชิงจุลภาคเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุ จะพบว่าที่จริงแล้วการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากการนำความร้อนระหว่างวัตถุกับของไหลที่ผิวสัมผัสนั่นเอง โดยปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะขึ้นอยู่กับการกระจายของอุณหภูมิของชั้นผิวสัมผัส (กล่าวคือ ขึ้นอยู่กับความชันของเส้นการแผ่กระจายของอุณหภูมิในตัวของไหลที่อยู่ใกล้มากๆ กับผิวหน้าของวัตถุ) ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจึงไม่ขึ้นอยู่กับประเภทของของไหลและรูปร่างของวัตถุเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นราบเรียบหรือปั่นป่วน และขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นอยู่ในช่วงเร่งความเร็วหรือมีความเร็วคงที่แล้ว ฯลฯ อีกด้วย ในที่นี้ เราจะรวมเอาปัจจัยที่ซับซ้อนเหล่านี้ไว้ในค่าที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$  [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]) โดยฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$q = h(T_\infty - T_w) \quad (3.17)$$

$T_w$  เป็นอุณหภูมิที่ผิวหน้าวัตถุ  $T_\infty$  เป็นอุณหภูมิของกระแสหลัก ณ จุดที่ห่างเพียงพอจากผิวหน้า มีสมการต่างๆ มากมายที่ใช้ในการคำนวณอัตราการพาความร้อน  $h$  ของวัตถุรูปร่างต่างๆ ที่อยู่ในการไหลแบบต่างๆ

เนื่องจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนไม่ได้เป็นสมบัติทางกายภาพของสสารเหมือนกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ดังนั้น ค่าของมันบางครั้งจึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนผิวหน้าของวัตถุ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนผิวหน้า เรียกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ ( $h_x$ ) และค่าเฉลี่ยทั่วผิวหน้าเรียกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ( $h_m$ ) หากให้พื้นที่ที่มีความร้อนถ่ายเทเท่ากับ  $A$  แล้ว ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านในหนึ่งหน่วยเวลา  $Q$  จะเท่ากับ

$$Q = h_m(T_\infty - T_w)A \quad (3.18)$$

กล่าวคือคิดเสมือนว่า

$$(\text{ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทด้วยการพาความร้อน}) = \frac{(\text{ความแตกต่างของอุณหภูมิ})}{(\text{ความต้านทานการพาความร้อน})}$$

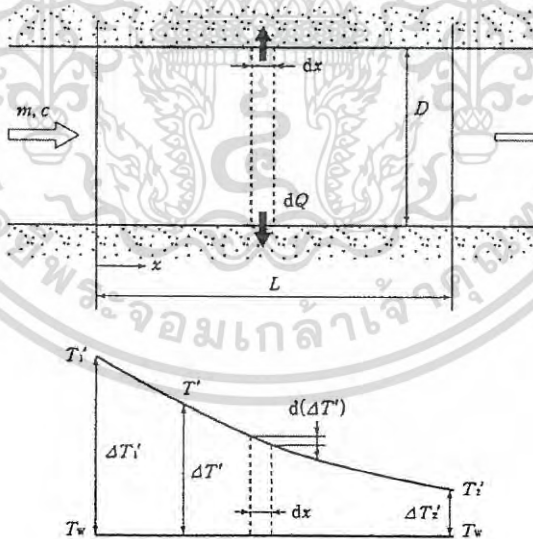
ถ้าให้ความต้านทานการพาความร้อนเท่ากับ  $R$ , แล้ว จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$Q = \frac{(T_\infty - T_w)}{R_t}, \quad R_t = \frac{1}{h_m A} \quad (3.19)$$

3.4.2.2 อุณหภูมิเฉลี่ยผสมในการไหลในท่อ กับผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม การคำนวณการพาความร้อนในกรณีที่มีผิวหน้าของวัตถุท่อหุ้มการไหลอยู่ เช่น การไหลในท่อกลม จะต้องใช้ความระมัดระวัง เนื่องจากการไหลในท่อที่ไหลด้วยความเร็วคงที่นั้น ทุกจุดในท่อจะเสมือนเป็นผิวสัมผัส กล่าวคือ ไม่เพียงแต่อุณหภูมิของของไหล ณ จุดที่ห่างเพียงพอกจากผิวหน้าจะมีค่าไม่เท่ากันเท่านั้น แต่อุณหภูมิของของไหลตามทิศทางการไหลก็ไม่คงที่ด้วย ดังนั้นในกรณีนี้ จึงเกิดปัญหาว่าจะใช้ค่าใดเป็นอุณหภูมิของตัวของไหล

รูปที่ 3.4 แสดงของไหลกำลังไหลอยู่ภายในท่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $D$  โดยที่ทางเข้าและทางออกซึ่งมีความยาวตามแนวแกนของท่อเท่ากับ  $L$  จะแทนด้วยตัวห้อย 1 และ 2 ในกรณีนี้ อุณหภูมิเฉลี่ยผสม  $T'$  ซึ่งใช้เป็นอุณหภูมิตัวแทนของของไหล ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกนของท่อภายในระหว่างช่วงดังกล่าวนี้จะมีนิยามดังต่อไปนี้

ในที่นี้  $T$  และ  $u$  หมายถึงอุณหภูมิและความเร็วของของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่เล็กๆ  $dS$  ณ ตำแหน่งใดๆ บนพื้นที่หน้าตัดตามลำดับ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยผสม จะเป็นอุณหภูมิที่ใช้แสดงในกรณีนี้ ถือว่าของเหลวที่ไหลผ่านจะ ผสมกันอย่างสมบูรณ์ในอุดมคติ ณ ทุกๆ พื้นที่หน้าตัด



รูปที่ 3.4 การพาความร้อนของการไหลในท่อ

ที่จุดนี้ ถ้าให้อุณหภูมิที่ผนังท่อด้านในระหว่างช่วงระยะทางนี้มีค่าคงที่เท่ากับ  $T_w$  และถือว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h_m$  จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งตามแนวแกนของท่อ และถือว่าความแตกต่างของอุณหภูมิ  $\Delta T'$  เท่ากับผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยผสม  $T'$  กับ  $T_w$  เมื่อให้ความร้อนจำเพาะและ

อัตราไหลโดยมวลของของไหลเท่ากับ  $c$  และ  $m$  ตามลำดับ และให้การเปลี่ยนแปลง  $\Delta T'$  ในบริเวณเล็กๆ ภายในระยะทาง  $dx$  ตามทิศทางความยาวเท่ากับ  $d(\Delta T')$  แล้ว ปริมาณความร้อน  $dQ$  ที่พาจากของไหลไปยังผนังท่อภายในช่วงระยะทางเล็กๆ นี้ จะเท่ากับความร้อนในของไหลที่ลดลงในช่วงระยะทางนี้ ดังนั้น

$$dQ = -mcd(\Delta T') = h_m(T_\infty - T_w)\pi Ddx = h_m\Delta T'\pi Ddx \quad (3.20)$$

$$-mcd(\Delta T') = h_m\Delta T'\pi Ddx, \quad \frac{1}{\Delta T'}d(\Delta T') = -\frac{h_m\pi D}{mc}dx \quad (3.21)$$

$$\ln(\Delta T') = -\frac{h_m\pi D}{mc}x + c \quad (3.22)$$

ในที่นี้เมื่อ  $x = 0$  แล้ว  $\Delta T' = \Delta T_1'$  และเมื่อ  $x = L$  แล้ว  $\Delta T' = \Delta T_2'$  จะได้ว่า

$$\ln(\Delta T') = -\frac{h_m\pi D}{mc}L + \ln(\Delta T_1') \quad (3.23)$$

ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลไปยังผนังท่อตลอดช่วงระยะทางนี้จึงเท่ากับ

$$Q = -mc(T_1' - T_2') = mc\{(T_1' - T_w) - (T_2' - T_w)\} = mc(T_1' - T_2') \quad (3.24)$$

ถ้าให้อุณหภูมิที่เป็นตัวแทนของอุณหภูมิของของไหลตลอดช่วงระยะทางนี้เท่ากับ  $T_m$  และให้ผลต่างระหว่าง  $T_m$  กับอุณหภูมิผนังท่อ  $T_w$  เท่ากับ  $\Delta T_m$  และให้

$$Q = h_m\Delta T_m\pi DL \quad (3.25)$$

แล้ว จากสมการ 3.23, 3.24 และ 3.25 จะคำนวณ  $\Delta T_m$  ได้ดังนี้

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1' - \Delta T_2'}{\ln(\Delta T_1') - \ln(\Delta T_2')} = \frac{\Delta T_1' - \Delta T_2'}{\ln\left(\frac{\Delta T_1'}{\Delta T_2'}\right)} = \frac{(T_1' - T_w) - (T_2' - T_w)}{\ln\left(\frac{T_1' - T_w}{T_2' - T_w}\right)} \quad (3.26)$$

ค่า  $\Delta T_m$  ที่มีนิยามตามข้างต้น เรียกว่า ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม ถ้าใช้  $\Delta T_m$  นี้แล้ว ปริมาณการพาความร้อนจะเท่ากับ

ปริมาณการพาความร้อน = (สัมประสิทธิ์การพาความร้อน)  $\times$  (ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม)  $\times$  (พื้นที่ผิวด้านในท่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การพาความร้อน

#### 3.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

การพาความร้อนระหว่างวัตถุกับของไหล เป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุประเภทของของไหล โครงสร้างของชั้นผิวสัมผัส ฯลฯ อย่างไรก็ตาม เราสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในรูปของฟังก์ชันของปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้ในการพาความร้อนด้วยการบังคับ จะมีปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h_x$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ] ความเร็วของกระแสหลัก  $u_\infty$  [ $m/s$ ] ความยาวที่เป็นตัวแทนของวัตถุหรือระยะทาง  $x$  [ $m$ ] (ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการไหลในท่อ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน หรือ ในกรณีของการไหลบนแผ่นวัตถุ ได้แก่ ระยะทางจากขอบแผ่นวัตถุ เป็นต้น) สัมประสิทธิ์ความหนืดของของไหล  $\mu$  [ $Pa \cdot s$ ] ความหนาแน่น  $\rho$  [ $kg/m^3$ ] ความร้อนจำเพาะ  $C_p$  [ $J/(kg \cdot K)$ ] สัมประสิทธิ์การนำความร้อน  $k$  [ $W/(m \cdot K)$ ] ซึ่งจากการทำ Dimensional analysis พบว่าปรากฏการณ์การพาความร้อนด้วยการบังคับสามารถอธิบายด้วยฟังก์ชันของปริมาณต่างๆดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{h_x x}{k}\right) = f\left\{\left(\frac{u_\infty x}{\mu / \rho}\right), \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)\right\} \quad (3.27)$$

พจน์ทั้ง 3 ในสมการข้างต้นเป็นปริมาณไม่มีหน่วยซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณทางฟิสิกส์หลายตัว มีชื่อเรียกว่า Nusselt number ( $Nu_x$ ), Reynolds number ( $Re_x$ ) และ Prandtl number ( $Pr$ ) ตามลำดับ

$$Nu_x = \frac{h_x x}{\lambda} \quad (3.28)$$

$$Re_x = \frac{u_\infty x}{\mu / \rho} = \frac{u_\infty \mu}{\nu} \quad (3.29)$$

$$Pr = \left(\frac{C_p \mu}{k}\right) = \frac{\mu / \rho}{k / (c_p \rho)} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.30)$$

ในที่นี้  $\nu$  เป็นสัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ ( $\nu = \mu / \rho$ ) และ  $\alpha$  เป็น Thermal diffusivity ( $\alpha = k / C_p \mu$ ) ดังนั้น สมการที่ 3.27 จึงเขียนได้ว่า

$$Nu_x = f(Re_x, Pr) \quad (3.31)$$

กล่าวคือ  $Nu_x$  สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันของ  $Re_x$  กับ  $Pr$  และจาก  $Nu_x$  จะสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h_x$  ( $h_x = Nu_x (k/x)$ ) ได้

### 3.5.2 สมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อนที่สำคัญ การไหลในท่อ, Flow in pipe

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.32)$$

Turbulent flow in pipe,  $Re > 6000$

$$Re = \frac{h_L D}{k} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3.33)$$

สมการข้างบนจะใช้ได้ดี เมื่อ  $Re > 6000$ ,  $0.7 < Pr < 16000$  และ  $L/D > 60$

### 3.6 การคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง

เพื่อต้องการลดจำนวนของกริดเซลล์และเวลาที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่วงที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง (periodic flow) ซึ่งการวิเคราะห์การไหลลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อ รูปทรงทางเรขาคณิตและรูปแบบที่ต้องการหาค่าผลเฉลยของการไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยธรรมชาติแล้วมีการซ้ำเป็นช่วงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการไหลแบบซ้ำเป็นช่วงสามารถแบ่งได้เป็น การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วและการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.6.1 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว

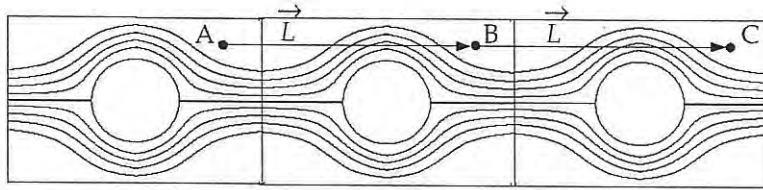
การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วเป็นลักษณะการไหลเมื่อมีค่าความดันตกคร่อมเกิดขึ้นข้ามขอบเขตการไหลตามแนวทิศทางการไหล โดยเกิดขึ้นกับการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์ ลักษณะการไหลเช่นนี้มีการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตที่ซ้ำกันไปตามแนวทิศทางการไหล โดยมีรูปแบบของการไหลเกิดขึ้นซ้ำกับเป็นวงรอบ สถานะการไหลที่ซ้ำเป็นช่วงนี้เกิดขึ้นหลังจากมีช่วงของความยาวขาเข้าที่เพียงพอ โดยขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ของการไหลและรูปร่างทางเรขาคณิตของช่องทางไหล

##### 3.6.1.1 นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

สถานะของการไหลซ้ำเป็นช่วงเกิดขึ้นเมื่อรูปแบบการไหลเกิดขึ้นซ้ำกันในช่วงการไหล  $L$  โดยมีค่าความดันตกคร่อมคงที่ในช่วงโมดูลของการไหลตามแนวทิศทางการไหล นิยามของการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว ถูกกำหนดโดยค่าของความเร็วย่อยนั้นจะซ้ำกันโดยตัวมันเอง ดังสมการ

$$u_i(\bar{r}) = u_i(\bar{r} + \bar{L}) = u_i(\bar{r} + 2\bar{L}) = \dots \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.34)$$

เมื่อ  $\bar{r}$  คือเวกเตอร์บอกตำแหน่ง และค่า  $\bar{L}$  คือเวกเตอร์ของความยาวที่ซ้ำเป็นช่วงของโดเมนการไหลที่พิจารณา สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง

จากรูปสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

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

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

### 3.6.1.2 นิยามของความดันเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

สำหรับการไหลแบบมีความหนืด ค่าของความดันจะไม่ซ้ำเป็นช่วงตามนิยามของความเร็ว แต่ค่าของความดันตกคร่อมช่วงของการไหลหรือโมดูลจะมีค่าเท่ากัน แสดงได้ดังสมการ

$$\Delta p = p(\vec{r}) - p(\vec{r} + \vec{L}) = p(\vec{r} + \vec{L}) - p(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \quad (3.35)$$

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

สมการ

$$\nabla p(\vec{r}) = \beta \frac{\vec{L}}{|\vec{L}|} + \nabla \tilde{p}(\vec{r}) \quad (3.36)$$

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

### 3.6.2 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน

การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนตามแนวทิศทางการไหล สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับการระบุฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนัง ในการไหลเช่นนี้ค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างขอบเขตที่ซ้ำเป็นช่วงจะมีค่าคงที่ และสัมพันธ์กับการเพิ่มความร้อนสุทธิจากขอบเขตของผนัง

เมื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นซ้ำกันเป็นช่วง สนามอุณหภูมิจะมีความคล้ายคลึงกับสนามของความดันในกรณีของการไหลเป็นช่วงเชิงความเร็ว โดยมีสมการดังนี้

$$\frac{T(\bar{r} + \bar{L}) - T(\bar{r})}{L} = \frac{T(\bar{r} + 2\bar{L}) - T(\bar{r} + \bar{L})}{L} = \sigma \quad (3.37)$$

เมื่อค่า  $\sigma$  คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนได้ในเทอมของการเพิ่มความร้อนทั้งหมดภายในโดเมน,  $Q$  ดังสมการ

$$\sigma = \frac{Q}{mc_p L} = \frac{T_{\text{bulk exit}} - T_{\text{bulk inlet}}}{L} \quad (3.38)$$

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

$$T_{\text{bulk}} = \frac{\int_A T |\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}|}{\int_A |\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}|} \quad (3.39)$$

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

### 3.7 สมการพื้นฐานสำหรับการไหล

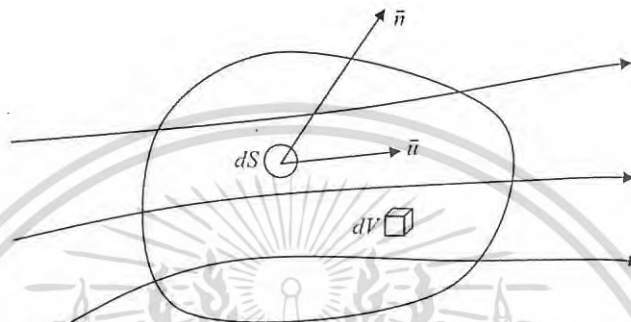
การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (computational fluid dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือช่วยแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) คำนวณเพื่อประมาณผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อน ซึ่งมีความยุ่งยากในการหาผลเฉลยด้วยวิธีแมนตรง หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับการบังคับ ซึ่งสมการบังคับพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (continuity equation) สมการโมเมนตัม (momentum equation) และสมการพลังงาน (energy equation) สมการดังกล่าวบ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพของของไหลและสิ่งที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการไหล โดยสมการบังคับเหล่านี้จะได้มาจากหลักทางกายภาพ 3 หลักด้วยกันคือ กฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) และสมการบังคับที่ได้จะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประมาณผลเฉลยของสมการอนุพันธ์สำหรับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference) ระเบียบวิธีจำกัดมูลฐาน (finite element) และ ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume) เป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์การไหลในเครื่องสูบน้ำ เป็นกรณีที่ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะเกิดการไหล จะใช้เพียงกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงขอเน้นเฉพาะกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.1 กฎอนุรักษ์มวล

เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมของไหลต่อเนื่องในสนามการไหลดังรูปที่ 3.6 การส่งถ่ายมวลเข้าออกปริมาตรควบคุม จะเป็นไปตามหลักการอนุรักษ์มวลคือ

อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลภายในปริมาตรควบคุม = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่ไหลผ่านผิวควบคุม



รูปที่ 3.6 ปริมาตรควบคุม

สามารถเขียนในรูปของสมการ คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (3.40)$$

สมการ (3.40) มีชื่อเรียกว่า สมการต่อเนื่อง (continuity equation) เมื่อพิจารณาการไหลในเครื่องสูบน้ำให้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (incompressible flow) พบว่าความหนาแน่นของน้ำคงที่ จะได้สมการต่อเนื่องเป็น

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.41)$$

### 3.7.2 กฎอนุรักษ์โมเมนตัม

หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเป็นการประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันและเมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมจะได้ว่า

อัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัมปริมาตรควบคุม = แรงลัพธ์สุทธิที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม

อัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัมของปริมาตรควบคุมเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุมกับโมเมนตัมสุทธิที่ไหลผ่านผิวควบคุม ดังสมการ

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V (\rho \bar{u} dV) + \iint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) \quad (3.42)$$

แรงลัพธ์สุทธิที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดแรกเป็นแรงเนื่องจากสนามดึงดูด (field force) ซึ่งได้แก่ แรงโน้มถ่วงโลก (body force) และแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิดที่สองเป็นแรงที่กระทำที่ผิว (surface force) ซึ่งแบ่งออกเป็นแรงในแนวตั้งฉากได้แก่ ความดัน ความเค้นอัดหรือดึง และแรงในแนวขนานกับผิว ได้แก่ ความเค้นเฉือน ดังสมการ

$$\iiint_V \rho \bar{f} dV + \iint_S \bar{\sigma} d\bar{S} \quad (3.43)$$

ดังนั้นสมการโมเมนตัม คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \bar{u} dV + \iint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) = \iiint_V \rho \bar{f} dV + \iint_S \bar{\sigma} d\bar{S} \quad (3.44)$$

ใช้ทฤษฎีของเกาส์ช่วยในการเปลี่ยนรูปสมการดังนี้

$$\iint_S \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{S}) = \iiint_V \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) dV \quad (3.45)$$

$$\iint_S \bar{\sigma} d\bar{S} = \iiint_V \nabla \cdot \bar{\sigma} dV \quad (3.46)$$

จะได้สมการโมเมนตัมในรูปสมการอนุพันธ์เชิงย่อยดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \bar{u} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = \rho \bar{f} + \nabla \cdot \bar{\sigma} \quad (3.47)$$

เรียกสมการ (3.47) ว่าสมการนาเวียร์-สโตคส์ (Navier-Stokes equation) และสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปเทนเซอร์ (tensor) ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_k)}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad (3.48)$$

พิจารณาแยกเทอม  $\rho u_j u_k$  เป็น  $\rho u_k$  และ  $u_j$  แล้วจัดรูปสมการอนุพันธ์เชิงย่อยใหม่จะได้

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad (3.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สมการความต่อเนื่องเพื่อกำจัดเทอมที่สองและสาม จะได้สมการนาเวียร์-สโตกส์ดังนี้

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad (3.50)$$

โดย

$$\sigma_{ij} = -\rho \delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (3.51)$$

สำหรับของไหลแบบนิวตัน (Newtonian fluid) ซึ่งความเค้นเฉือนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไหล ได้เทนเซอร์ความเค้นเฉือน (shear stress tensor) คือ

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.52)$$

แทนค่าเทนเซอร์ความเค้นเฉือนในสมการ (3.51) ได้เทนเซอร์ความเค้น (stress tensor) คือ

$$\sigma_{ij} = -\rho \delta_{ij} + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.53)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์ (absolute or dynamic viscosity coefficient)

$\lambda$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง (second viscosity coefficient)

$\delta_{ij}$  คือ Kronecker delta (มีค่าเป็น 1 เมื่อ  $i = j$  และมีค่าเป็น 0 เมื่อ  $i \neq j$ )

สโตกส์ (Stokes) ตั้งสมมุติฐานความสัมพันธ์ระหว่าง  $\mu$  และ  $\lambda$  ไว้ดังนี้

$$\lambda = -\frac{2}{3} \mu \quad (3.54)$$

แทนค่าเทนเซอร์ความเค้นในสมการนาเวียร์-สโตกส์ ได้สมการนาเวียร์-สโตกส์ที่สมบูรณ์ คือ

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho f_j \quad (3.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาการไหลในเครื่องสูบน้ำให้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ ทำให้เทอมที่สองทางด้านขวามือของสมการ (3.55) มีค่าเป็นศูนย์และเทอมที่สามสามารถจัดรูปสมการใหม่เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] = \mu \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} \right] = \mu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} \quad (3.56)$$

จะได้สมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับกรณีไหลแบบอัดตัวไม่ได้และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ ดังนี้

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} + \rho f_j \quad (3.57)$$

### 3.7.3 การไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบปั่นป่วน ค่าของตัวแปรต่างๆมีค่าไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป เช่น ความเร็ว เป็นต้น ดังภาพที่ 3.7 แสดงค่าของความเร็ว  $u$  ในการไหลแบบปั่นป่วน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้มีความยุ่งยากในการคำนวณค่าตัวแปร เพื่อให้สามารถคำนวณได้ง่ายจึงสมมุติให้คุณสมบัติต่างๆ ที่พิจารณาแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนปริมาณเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา เช่น  $\bar{u}$   $\bar{v}$  หรือ  $\bar{p}$  กับส่วนที่กระเพื่อม (fluctuation) เช่น  $u'$   $v'$  หรือ  $p'$



รูปที่ 3.7 ค่าความเร็ว  $u$  ในการไหลแบบปั่นป่วน

เมื่อทำการเฉลี่ยปริมาณใดๆ ในสมการควบคุมตลอดช่วงเวลาช่วงหนึ่ง จะทำให้เกิดตัวแปรขึ้นมาใหม่ ส่งผลให้มีจำนวนตัวแปรไม่รู้ค่ามากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ จึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence model) มาช่วย เพื่อทำให้ปัญหาเป็นปัญหาแบบปิด (close problem) ให้สามารถหาผลเฉลยได้

สมการบังคับของการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ มีอุณหภูมิคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดสัมบูรณ์มีค่าคงที่ ประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.58)$$

สมการนาเวียร์-สโตคส์

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.59)$$

จากการสมมติให้ตัวแปรต่างๆ สามารถแบ่งออกเป็นส่วนของค่าเฉลี่ยและส่วนของการกระเพื่อม ตัวอย่างเช่น ตัวแปรใดๆ  $\phi$  แบ่งออกเป็น

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (3.60)$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (time-averaging) จะได้

$$\phi(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \phi(x, t) dt \quad (3.61)$$

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยแล้ว จะทำให้ค่าเฉลี่ยในส่วนของการกระเพื่อมมีค่าเป็นศูนย์ ( $\bar{\phi}' = 0$ ) และจะได้ค่าเฉลี่ยของผลคูณทั้งสองตัวแปรเป็น ( $\overline{\phi\beta} = \bar{\phi}\bar{\beta} + \overline{\phi'\beta'}$ )

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ด้วยผลรวมของค่าเฉลี่ยและส่วนของการกระเพื่อม แล้วทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง จะได้สมการบังคับเป็น

สมการความต่อเนื่องสำหรับค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.62)$$

สมการนาเวียร์-สโตคส์สำหรับค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.63)$$

สมการ (3.62) และ (3.63) เรียกว่า สมการนาเวียร์-สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Reynolds-averaged Navier-Stokes equation, RANS) จะสังเกตได้ว่าสมการที่ได้นี้มีรูปแบบคล้ายคลึงกับสมการนาเวียร์-สโตคส์ เพียงแต่มีเทอมของ ค่าความเค้นของเรย์โนลด์ (Reynolds stress)  $\tau_{ij} = \overline{\rho u'_i u'_j}$  เพิ่มขึ้นมาในสมการ ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลที่เป็นแบบปั่นป่วนนั่นเอง เทอมความเค้นของเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้นมานี้เป็นผลทำให้จำนวนตัวแปรมีมากกว่าจำนวนสมการที่มีอยู่ ทำให้ไม่สามารถแก้สมการได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อทำให้ปัญหาเป็นแบบปิด ซึ่งจะได้กล่าวถึงแบบจำลองนี้ต่อไป

### 3.7.3.1 แบบจำลองความปั่นป่วน

การหาผลเฉลยสมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-สโตคส์จากการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (RANS) ต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วนมาช่วยในการคำนวณ โดยใช้หาค่าความเค้นของเรย์โนลด์ ซึ่งจะช่วยให้ไม่ต้องหาค่าของการกระเพื่อม แต่จะสนใจเฉพาะส่วนของค่าเฉลี่ยเท่านั้น สำหรับการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้น จึงจะสามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำ ใช้ระยะเวลาและหน่วยความจำน้อยที่สุด ตัวอย่างแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้กันมีหลายแบบ เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\varepsilon$  แบบจำลองความปั่นป่วน RNG  $k-\varepsilon$  แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\omega$  แบบจำลองความปั่นป่วน The Shear-Stress Transport (SST)  $k-\omega$  แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds Stress Model (RSM) เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองความปั่นป่วน RNG  $k-\varepsilon$

#### แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$

แบบจำลอง RNG  $k-\varepsilon$  เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากการใช้วิธีเชิงสถิติอย่างแม่นยำ (ซึ่งเรียกว่าทฤษฎี renormalization group, RNG) ซึ่งคล้ายกับแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน แต่ได้เพิ่มเทอมต่างๆ เข้าไป ดังต่อไปนี้

- (1) ทฤษฎี RNG ให้สมการสำหรับการวิเคราะห์เลขพราวน์ดของความปั่นป่วน ในขณะที่แบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐานจะใช้วิธีระบุเป็นค่าคงที่
- (2) แบบจำลอง RNG นั้นได้รวมอิทธิพลของการหมุนวน (rotation หรือ swirl) ต่อการไหลปั่นป่วน และเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลหมุนวน
- (3) แบบจำลอง RNG ได้เพิ่มพจน์เข้าไปในสมการ  $\varepsilon$  ซึ่งมีส่วนสำคัญในการปรับปรุงความแม่นยำสำหรับการไหลที่เกิดความเครียดอย่างรวดเร็ว
- (4) ในขณะที่แบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐานเป็นแบบจำลองสำหรับเลขเรย์โนลด์สูง แต่ทฤษฎี RNG ให้สมการการวิเคราะห์ในรูปสมการอนุพันธ์สำหรับค่าความหนืดยังผล ( $\mu_{eff}$ ) ที่ใช้ในการคำนวณสำหรับอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่ำ ซึ่งผลของการคำนวณในลักษณะนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการจำลองการไหลที่ใกล้กับผนัง

จากลักษณะดังกล่าวข้างต้นทำให้แบบจำลอง RNG  $k-\varepsilon$  มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือได้สำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์การไหลที่หลากหลายมากกว่าแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน

สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง RNG  $k$ - $\varepsilon$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.64)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (3.65)$$

ค่าความหนืดยังผล ( $\mu_{eff}$ ) โดยทั่วไปมีสมการเป็น

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.66)$$

ค่า  $\alpha_k$  และ  $\alpha_\varepsilon$  คือเลขพรานด์ยังผลผกผัน (inverse effective Prandtl numbers) สำหรับค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  ตามลำดับ ซึ่งถูกคำนวณจากสมการที่ได้พัฒนาขึ้นมาจากทฤษฎี RNG ดังนี้

$$\frac{\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321}}{\left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679}} = \frac{\mu}{\mu_{eff}} \quad (3.67)$$

เมื่อค่า  $\alpha_0 = 1.0$  สำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง ( $\mu/\mu_{eff} \ll 1$ ) ผลจากการคำนวณพบว่า  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon \approx 1.393$

ความแตกต่างที่สำคัญของแบบจำลอง RNG กับแบบจำลอง  $k$ - $\varepsilon$  มาตรฐาน ก็คือการเพิ่มค่า  $R_\varepsilon$  เข้าไปในสมการ  $\varepsilon$  ซึ่งกำหนดโดย

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (3.68)$$

เมื่อ  $\eta = Sk/\varepsilon$ ,  $\eta_0 = 4.38$  และ  $\beta = 0.012$

อิทธิพลของ  $R_\varepsilon$  ของสมการ  $\varepsilon$  ในแบบจำลอง RNG สามารถเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อจัดรูปใหม่จะได้สมการดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.69)$$

$$\text{เมื่อ} \quad C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (3.70)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบริเวณที่อยู่ในชั้นของการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ( $\eta < \eta_0$ ) ค่า  $C_{2\varepsilon}^* > C_{2\varepsilon}$  เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน จากผลที่ได้ทำให้มีการทำลายค่า  $\varepsilon$  เพิ่มขึ้น ค่า  $\varepsilon$  จึงลดลง และส่งผลให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้น ดังนั้นสำหรับการไหลที่มีความเครียดเฉือนน้อยถึงปานกลาง แบบจำลอง RNG จะให้ค่าความหนืดปั่นป่วนที่มีแนวโน้มมากกว่าแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน

สำหรับในบริเวณที่มีอัตราความเครียดสูง ( $\eta > \eta_0$ ) จะส่งผลให้ค่า  $C_{2\varepsilon}^* < C_{2\varepsilon}$  เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน การทำลายที่น้อยลงของค่า  $\varepsilon$  จะทำให้ค่า  $\varepsilon$  เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่า  $k$  ลดลง ซึ่งทำให้การไหลจะได้รับอิทธิพลจากความหนืดของของไหล ดังนั้นการไหลที่มีความเครียดเฉือนอย่างรวดเร็ว แบบจำลอง RNG จะให้ค่าความหนืดปั่นป่วนต่ำกว่าค่าในแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน ดังนั้น แบบจำลอง RNG จะตอบสนองต่ออิทธิพลของความเครียดเฉือนและความโค้งของเส้นกระแสมากกว่าแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน

ทฤษฎี RNG ให้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับการวิเคราะห์ความหนืดอันเนื่องมาจากความปั่นป่วน (turbulent viscosity) ดังนี้

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon}\mu}\right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_v}} d\hat{\nu} \quad (3.71)$$

เมื่อ  $\hat{\nu} = \mu_{eff} / \mu$  และ  $C_v \approx 100$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (3.71) จะได้ค่าที่แม่นยำของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนย้าย ที่เกิดจากอิทธิพลของความปั่นป่วนกับอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ (หรือในระดับการหมุนวนขนาดเล็ก) ซึ่งแบบจำลองนี้จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีสำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำในบริเวณใกล้กับผนัง

ในกรณีการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง สมการที่ (3.71) จะเปลี่ยนไปเป็น

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.72)$$

โดยที่ค่า  $C_\mu = 0.0875$  ซึ่งค่านี้ได้มาจากทฤษฎี RNG และมีข้อสังเกตที่น่าสนใจว่าค่า  $C_\mu$  นี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทดลองที่มีค่า  $C_\mu = 0.09$  ในสมการแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน โดยทั่วไปแล้วอิทธิพลเนื่องจากความหนืดปั่นป่วนนั้นจะถูกคำนวณโดยใช้การคำนวณในกรณีเลขเรย์โนลด์สูงในสมการที่ (3.72) อย่างไรก็ตามเมื่อต้องการรวมอิทธิพลของการไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ แบบจำลอง RNG จะมีทางเลือกที่สามารถใช้ได้โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ดังได้แสดงในสมการที่ (3.72)

ค่าคงที่ในสมการของแบบจำลอง RNG แสดงได้ดังนี้

$$C_{1\varepsilon} = 1.42; \quad C_{2\varepsilon} = 1.68$$

## บทที่ 4

# การออกแบบอุปกรณ์และขั้นตอนการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์และขั้นตอนการศึกษา โดยจะอธิบายถึงการปรับปรุงรูปแบบของแหวนทรงกรวยที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งรูปแบบแหวนทรงกรวยได้ปรับปรุงรูปทรงให้หลากหลายเพื่อวิเคราะห์หารูปทรงที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงค่าตัวประกอบเสียดทาน, ค่าการถ่ายเทความร้อน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเป็นหลัก การปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยได้กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หลักๆ ดังนี้ คือ อัตราส่วนระยะพิตช์  $P_R(L/D)$ , อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า  $D_{R,i}(d_i/D)$ , อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R,o}(d_o/D)$  และ องศาในแนวระนาบ ( $\alpha$ )

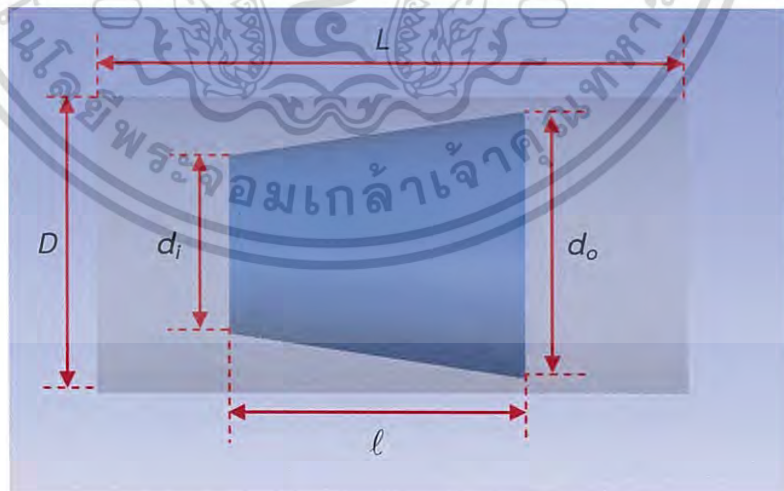
### 4.1 รูปแบบของแหวนทรงกรวยที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้เริ่มต้นศึกษาแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมคือ แหวนทรงกรวยตัดที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปทรง โดยได้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- 1) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า  $D_{R,i}=0.6$
- 2) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R,o}=0.9, 0.95, 0.97$
- 3) อัตราส่วนระยะพิตช์  $P_R=2.0$
- 4) ความยาวแหวนทรงกรวย ( $l$ )=1D หรือเท่ากับ 50 มิลลิเมตร
- 5) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ )=0.05 เมตร หรือ 50 มิลลิเมตร

เมื่อนำแหวนทรงกรวยแบบมาตรฐานใส่ภายในท่อกลมผิวเรียบจะสามารถแสดงให้เห็นได้ดัง

ภาพที่ 4.1



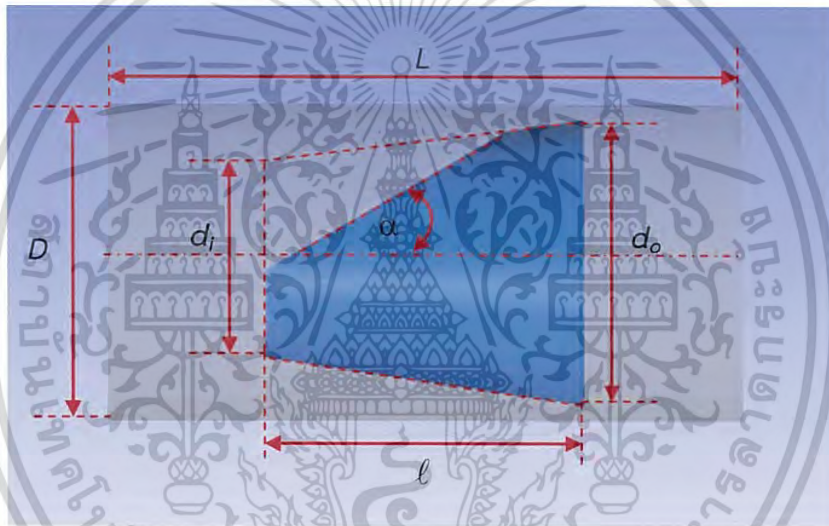
รูปที่ 4.1 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

หลังจากศึกษาแหวนทรงกรวยที่ใส่ภายในท่อกลมแบบมาตรฐานพบว่า การใส่แหวนทรงกรวยภายในสามารถทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในได้ จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิที่ผนังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้ณาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อกลมมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ แต่อย่างไรก็ตามการใส่แหวนทรงกรวยภายในยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมาก จึงเป็นสาเหตุให้ทำการปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยเพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทาน โดยกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- 1) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า  $D_{R_i}=0.6$
- 2) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R_o}=0.9, 0.95, 0.97$
- 3) อัตราส่วนระยะพิทช์  $P_R=2.0$
- 4) ความยาวแหวนทรงกรวย ( $l$ )= $1D$  หรือเท่ากับ 50 มิลลิเมตร
- 5) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ )= $0.05$  เมตร หรือ 50 มิลลิเมตร
- 6) องศาในแนวระนาบ ( $\alpha_1$ )= $30^\circ$  และ  $27^\circ$

การปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 1 (ตัดองศาด้านหน้า) ที่ใส่ภายในท่อกลมผิวเรียบจะสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.2

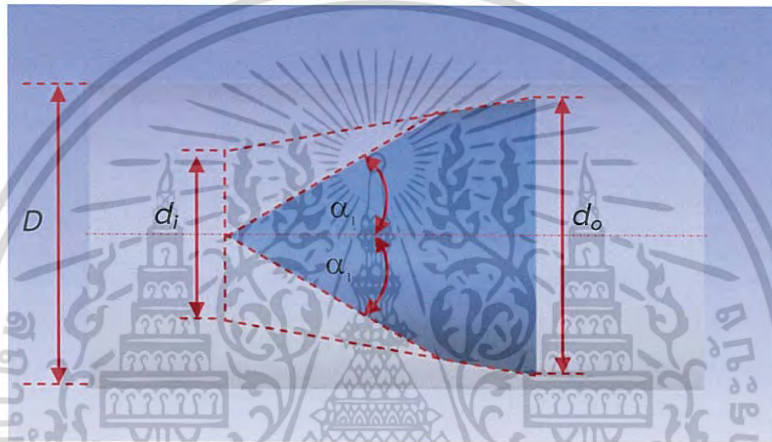


รูปที่ 4.2 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 (ตัดองศาด้านหน้า)

เมื่อได้ทำการศึกษาแหวนทรงกรวยที่มีการปรับปรุงแบบที่ 1 (ตัดองศาด้านหน้า) พบว่า การใส่แหวนทรงกรวยภายในสามารถเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนภายในได้ จึงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิที่ผนังท่อกลมมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมแต่อย่างไรก็ตามการใส่แหวนทรงกรวยภายในยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแต่เมื่อเทียบกับการใส่แหวนทรงกรวยแบบมาตรฐานพบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลงมาก และองศาในการตัดยังมีผลต่อการช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานได้อีกด้วย ดังนั้นจึงเป็นผลให้ทำการปรับปรุงแหวนทรงกรวยโดยทำการตัดองศาด้านหน้าบน-ล่าง (รูปตัววี) เพื่อช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทาน โดยกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- 1) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางเข้า  $D_{R,i}=0.6$
- 2) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออก  $D_{R,o}=0.9, 0.95, 0.97$
- 3) อัตราส่วนระยะพิทช์  $P_R=2.0$
- 4) ความยาวแหวนทรงกรวย ( $l$ )=1D หรือเท่ากับ 50 มิลลิเมตร
- 5) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ )=0.05 เมตร หรือ 50 มิลลิเมตร
- 6) องศาในแนวระนาบ ( $\alpha_1$ )=30° และ 26°

การปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 2 (รูปตัววีด้านหน้า) สามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.3 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละพารามิเตอร์ และภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงภาพ 3 มิติของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 2 (รูปตัววีด้านหน้า)



รูปที่ 4.3 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 (รูปตัววีด้านหน้า)



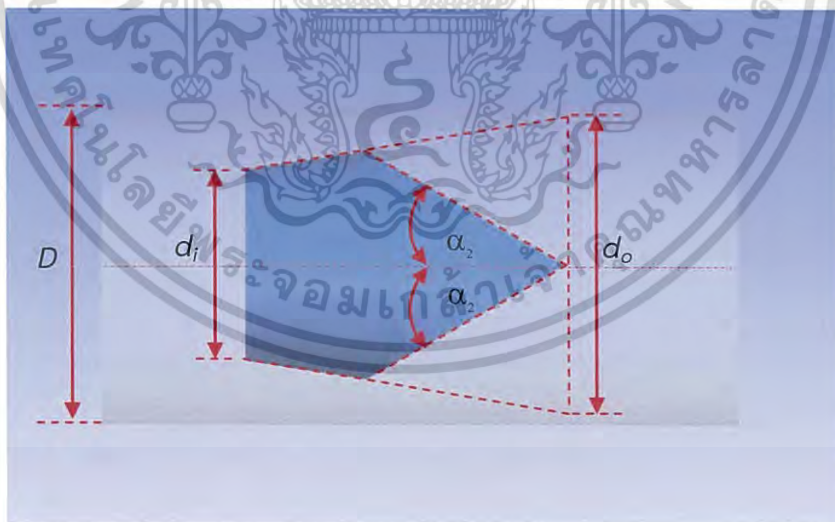
รูปที่ 4.4 ภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 (รูปตัววีด้านหน้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ทำการศึกษาแหวนทรงกรวยที่มีการปรับปรุงแบบที่ 2 (รูปตัววีด้านหน้า) พบว่า การใส่แหวนทรงกรวยภายในสามารถทำให้การไหลแบบปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้นและเกิดการกระจายอุณหภูมิมากขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิที่ผนังท่อกลมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมแต่อย่างไรก็ตามการใส่แหวนทรงกรวยที่มีการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 2 (รูปตัววีด้านหน้า) ยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแหวนทรงกรวยที่มีการปรับปรุงแบบที่ 1 (ตัดองศาด้านบน) และองศาในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นยังมีผลต่อการช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานได้อีกด้วย ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ทำการปรับปรุงแหวนทรงกรวยโดยทำการตัดองศาของแหวนทรงกรวยเป็นแบบรูปตัววีที่ด้านหลังเพื่อช่วยเพิ่มองศาในการตัดให้มากขึ้นเนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้ามีขนาดเล็กจึงสามารถตัดองศาได้มากขึ้น จากการศึกษาได้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- 1) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า  $D_{R_i}=0.6$
- 2) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R_o}=0.9, 0.95, 0.97$
- 3) อัตราส่วนระยะพิตช์  $P_R=2.0$
- 4) ความยาวแหวนทรงกรวย ( $l$ )= $1D$  หรือเท่ากับ 50 มิลลิเมตร
- 5) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ )= $0.05$  เมตร หรือ 50 มิลลิเมตร
- 6) องศาในแนวระนาบ ( $\alpha_2$ )= $17^\circ$

การปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 3 (รูปตัววีด้านหลัง) ที่ใส่ภายในท่อกลมผิวเรียบจะสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.5 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละพารามิเตอร์ และภาพที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงภาพ 3 มิติของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 3 (รูปตัววีด้านหลัง)



รูปที่ 4.5 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 (รูปตัววีด้านหลัง)

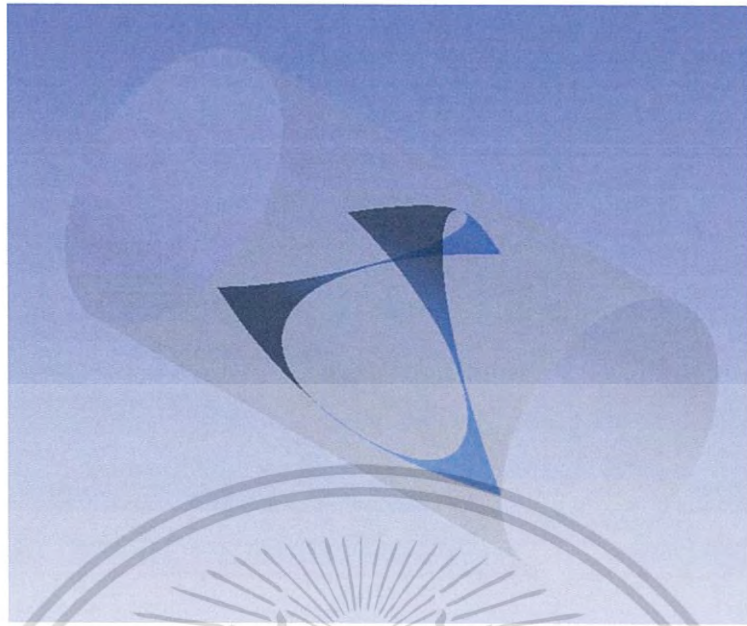
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



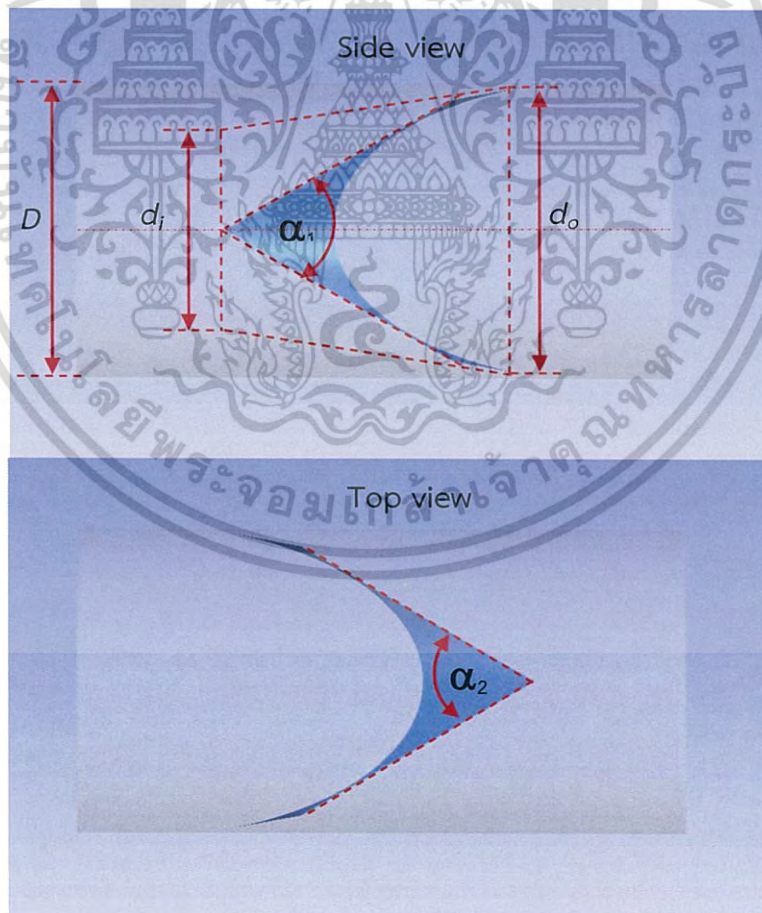
รูปที่ 4.6 ภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 (รูปตัววีด้านหลัง)

การปรับปรุงแหวนทรงกรวยปรับปรุง 4 (ตัดรูปตัววีด้านหน้าและตัดรูปตัววีด้านหลังแบบหมุนองศา) โดยการมองภาพแบบมุมด้านข้างและมุมบนเป็นดังภาพที่ 4.8 โดยรูปทรงแบบ 3 มิติ เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 แสดงให้เห็นดังภาพที่ 4.7 และการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆในการศึกษาเป็นดังนี้

- 1) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า  $D_{R,i}=0.6$
- 2) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R,o}=0.9, 0.95, 0.97$
- 3) อัตราส่วนระยะพิตช์  $P_R=2.0$
- 4) ความยาวแหวนทรงกรวย ( $\ell$ )= $1D$  หรือเท่ากับ 50 มิลลิเมตร
- 5) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ )=0.05 เมตร หรือ 50 มิลลิเมตร
- 6) องศาด้านหน้า-องศาด้านหลัง  $(\alpha_1, -\alpha_2)=(30^\circ-60^\circ)$  และ  $(70^\circ-20^\circ)$



รูปที่ 4.7 ภาพ 3 มิติของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4



รูปที่ 4.8 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4

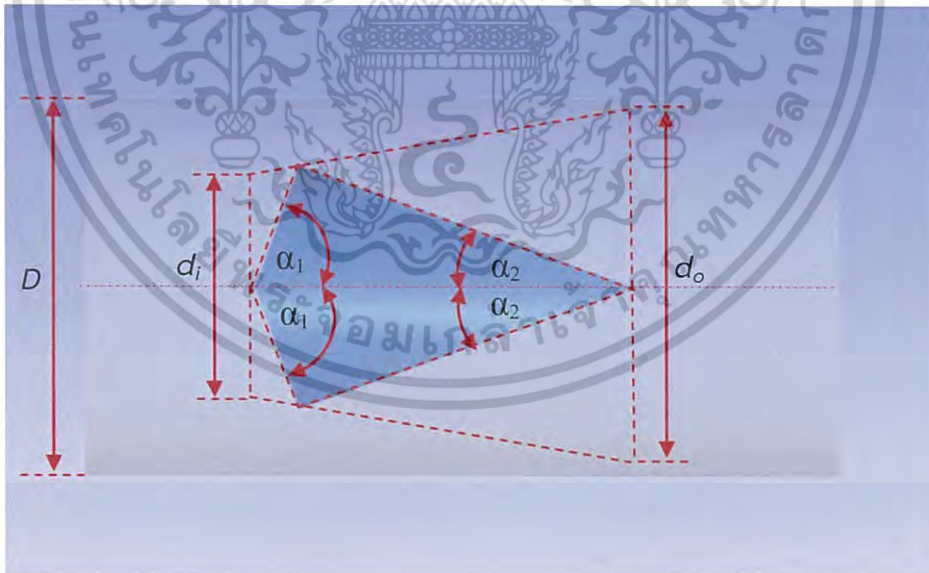
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาที่ทอกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 หรือการตัดรูปตัววีด้านหน้า และด้านหลังแบบหมุนองศาในการตัด 90 องศา พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าสูงแต่เมื่อเทียบกับแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด) ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนน้อยกว่า และเมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนพบว่าแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ยังให้ค่าน้อยกว่าแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด) ถึงแม้ว่าแหวนรูปกรวยแบบปรับปรุง 4 จะให้ค่าตัวประกอบเสียดทานที่น้อยกว่าก็ตาม

การตัดกรวยเป็นทรงข้าวหลามตัดหรือทรงเพชร เพื่อช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานและเพื่อช่วยเพิ่มการกระจายอุณหภูมิให้มากขึ้น ทั้งกระนั้นยังเป็นการเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้สูงขึ้นอีกด้วย โดยการศึกษานี้ได้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- 1) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า  $D_{R_i}(d_i/D)=0.6$
- 2) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R_o}(d_o/D)=0.9, 0.95, 0.97$
- 3) อัตราส่วนระยะพิตซ์  $P_R(L/D)=2.0$
- 4) ความยาวแหวนทรงกรวย ( $L$ )= $1D$  หรือเท่ากับ 50 มิลลิเมตร
- 5) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ )= $0.05$  เมตร หรือ 50 มิลลิเมตร
- 6) องศาด้านหน้า-องศาด้านหลัง  $(\alpha_1-\alpha_2)=(30^\circ-60^\circ)$  และ  $(70^\circ-20^\circ)$

แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด) ที่ใส่ภายในท่อกลมผิวเรียบจะสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.9 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละพารามิเตอร์ และภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด)



รูปที่ 4.9 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

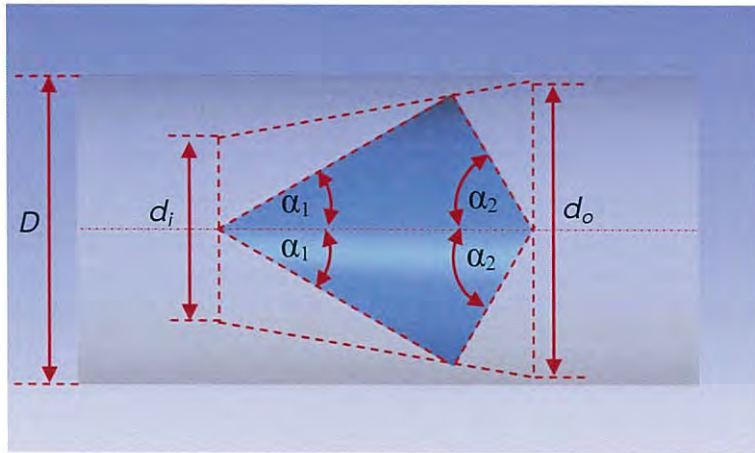


รูปที่ 4.10 ภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด)

จากการศึกษาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 หรือทรงข้าวหลามตัดโดยตัดรูปตัววีด้านหน้า และด้านหลังพบว่า การปรับปรุงรูปทรงนี้สามารถช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนได้สูงขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบองศาในการตัดที่องศาด้านหน้า-องศาด้านหลัง  $(\alpha_1 - \alpha_2) = (30^\circ - 60^\circ)$  และ  $(70^\circ - 20^\circ)$  พบว่าการตัดองศา  $(70^\circ - 20^\circ)$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนพบว่าการตัดองศาที่  $(30^\circ - 60^\circ)$  ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่การตัดองศา  $(70^\circ - 20^\circ)$  แต่ค่าตัวประกอบเสียดทานยังมีค่าสูงจึงทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวยเพื่อช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานและเพื่อชะลอการปรับค่าต่ำลงของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อพิจารณาที่เรโนลด์ส์สูงขึ้นด้วย ในการศึกษาได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- 1) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า  $D_{R_i} = 0.7, 0.8$
- 2) อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R_o} = 0.97, 0.98, 0.99$
- 3) อัตราส่วนระยะพิทช์  $P_R = 1.5, 2.0, 2.5$
- 4) ความยาวแหวนทรงกรวย  $(\ell) = 1D$  หรือเท่ากับ 50 มิลลิเมตร
- 5) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ  $(D) = 0.05$  เมตร หรือ 50 มิลลิเมตร
- 6) องศาด้านหน้า-องศาด้านหลัง  $(\alpha_1 - \alpha_2) = (33.5^\circ - 60^\circ)$

แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด) โดยปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าและทางออกใหญ่ขึ้นสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 4.11 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละพารามิเตอร์ และภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด) โดยปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าและทางออกใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.11 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด) โดยปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าและทางออกใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.12 ภาพ 3 มิติของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด) โดยปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าและทางออกใหญ่ขึ้น

จากการปรับปรุงแหวนทรงกรวยโดยตัดต่อความเป็นแบบทรงข้าวหลามตัด ทำให้ทราบว่าช่วยห้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวยยังช่วยชะลอการลดลงของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อค่าเรโนลด์เพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย

ดังนั้นจากการศึกษาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงทั้งแบบที่ 1, 2, 3, 4, 5 และแบบมาตรฐานจึงเป็นเหตุผลให้สรุปได้ว่าแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 หรือทรงข้าวหลามตัด มีความเหมาะสมในการศึกษาและน่าสนใจมากที่สุด เนื่องจากให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุด และเมื่อปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแหวนทรงกรวยที่ทางเข้าและทางออกยังช่วยห้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้นและยังช่วยชะลอค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้ลดช้าลงเมื่อเพิ่มค่าเรโนลด์ให้สูงขึ้นด้วย การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาการถ่ายเทความร้อน, ค่าตัวประกอบเสียดทานและลักษณะการไหลของของไหลทดสอบ เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงทั้งแบบที่ 1, 2, 3, 4, 5 และแบบดั้งเดิมจะได้กล่าวถึงในบทต่อไปเพื่อเปรียบเทียบค่าในแต่ละหัวข้อและเพื่อการพิจารณาอย่างเหมาะสม

#### 4.2 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา

สมการต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการหลักๆ ทั้งหมด 4 สมการที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบไปด้วยสมการตัวเลขเรย์โนลด์ส์ ( $Re$ ), สมการตัวประกอบความเสียดทานแฟนนิง ( $f$ ), สมการตัวเลขนัสเซลท์ ( $Nu$ ), และสมการตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน ( $TEF$ ) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละสมการมีดังนี้

- (1) เลขเรย์โนลด์ส์

$$Re = \rho u_0 D / \mu \quad (4.1)$$

- (2) ตัวประกอบความเสียดทานแฟนนิง

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

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

- (3) ตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่

$$Nu_s = h_s D / k_a \quad (4.3)$$

- (4) ตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_s dA \quad (4.4)$$

- (5) ตัวประกอบของการเพิ่มทางความร้อน

$$TEF = \frac{h}{h_0} \Big|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \Big|_{pp} = (Nu / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (4.5)$$

การวิเคราะห์หารูปแบบแหวนทรงกรวยที่เหมาะสมจะเปรียบเทียบผลจากค่าที่ได้จากสมการหลักๆ ข้างต้น เพื่อเป็นตัวชี้วัดรูปแบบที่เหมาะสม โดยหลักการวิเคราะห์คร่าวๆ คือ ค่าตัวประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียดทานต้องมีค่าต่ำ ค่าตัวเลขนัสเซลล์หรือค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต้องมีค่าสูง และค่าตัวประกอบเสียดทานของการเพิ่มทางความร้อนหรือค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนต้องมีค่าสูง ซึ่งค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะเป็นตัวชี้วัดสุดท้ายสุดที่จะบ่งชี้ได้ว่าแหวนทรงกรวยนี้เหมาะสมในการศึกษาหรือไม่

#### 4.3 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณการไหลสามมิติ

สำหรับการคำนวณในสามมิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

- 4.3.1 กำหนดให้สภาวะที่ทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translation
- 4.3.2 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบไหล
- 4.3.3 กำหนดอากาศที่ 300K
- 4.3.4 คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้า
- 4.3.5 กำหนดให้ค่าเลขพรานด์เทิล (Prandtl number; Pr) คงที่เท่ากับ 0.707 ไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่
- 4.3.6 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังความเร็วมีค่าเท่ากับศูนย์ (no slip condition) เป็นผนังที่อยู่กับที่ (stationary wall)
- 4.3.7 กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนของแหวนทรงกรวยมีค่าเท่ากับศูนย์หรือเป็นฉนวน
- 4.3.8 กำหนดให้ผนังของท่อกลมมีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่  $600 \text{ W/m}^2$

#### 4.4 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เหมาะสม

การตรวจสอบหาจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสม ที่มีอากาศเป็นของไหลทดสอบซึ่งใส่แหวนทรงกรวยเป็นตัวสร้างความปั่นป่วนของการไหล โดยจัดวางแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมแบบขวางการไหล กำหนดให้พิจารณาการไหลแบบเป็นคาบ (periodic) โดยคำนวณการไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง หรืออาจเรียกว่าการคำนวณแบบเป็นโมดูล มีโดเมนการไหลเป็นแบบสมมาตร (symmetry planes) ลักษณะการตกริดของงานวิจัยนี้ได้แสดงดังภาพที่ 4.13



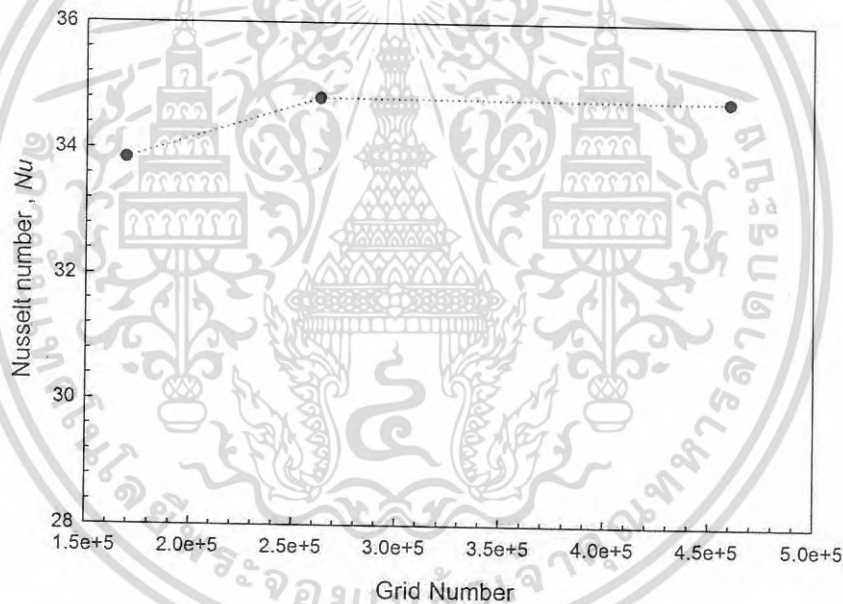
รูปที่ 4.13 แบบจำลองการตกริดของท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวย

กริดที่ใช้สำหรับงานวิจัยที่มีการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมนี้ได้ใช้การแบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ(non-uniform grid) ซึ่งจะพิจารณาบริเวณที่ติดผนังให้มีจำนวนกริดหนาแน่นโดยอัตโนมัติ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นชั้น Layer และบริเวณที่ห่างออกไปจากผนังก็มีจำนวนกริดเบาบางลงและตึกกริดเป็นแบบ polyhedral แต่ที่แหวนทรงกรวยที่ใส่ภายในท่อใช้กริดแบบสี่เหลี่ยม ส่วนการหาผลกระทบบของกริดที่มีผลต่อคำตอบได้ทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณของกริดที่แตกต่างกัน จำนวน 3 ช่วง คือ ที่ 168981, 262968 และ 460144 ตามลำดับ ซึ่งการทดสอบได้ใช้วิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE และใช้แบบแผนการคำนวณแบบ QUICK สำหรับการคำนวณ Momentum, Turbulent และ Energy โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตตั้งหัวข้อที่ 4.3 เงื่อนไขการรู้เข้าหาคำตอบของทุกค่าอยู่ที่  $10^{-5}$  ยกเว้นสมการพลังงานซึ่งอยู่ที่  $10^{-9}$  ผลการทดสอบได้ตั้งรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.1 จำนวนของกริดที่ใช้ในการทดสอบ

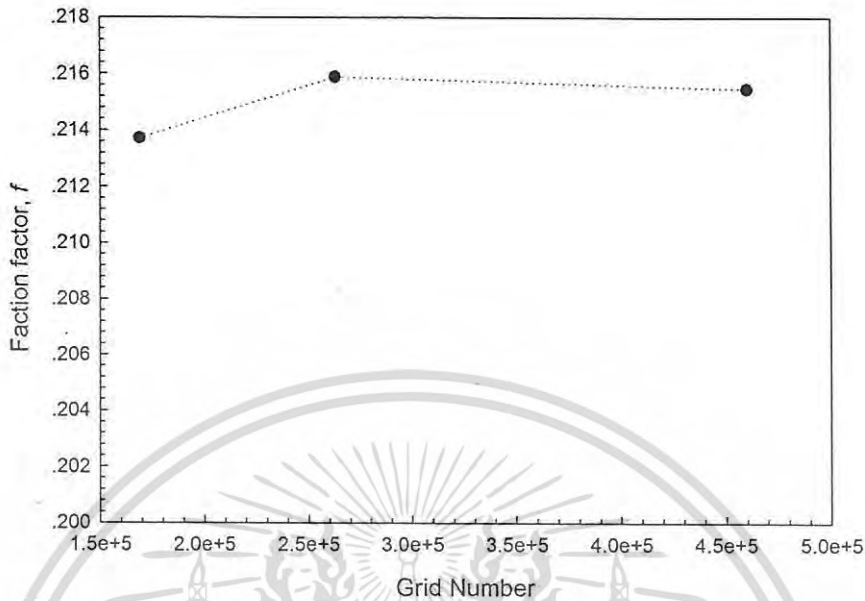
| Grid number | 168981   | 262968   | 460144   |
|-------------|----------|----------|----------|
| $Nu$        | 33.8436  | 34.80404 | 34.77023 |
| $f$         | 0.213708 | 0.215877 | 0.21546  |



รูปที่ 4.14 อิทธิพลของจำนวนกริดต่อค่า  $Nu$  ที่  $Re=3,000$

จากรูปที่ 4.14 ชี้ให้เห็นว่าการตีจำนวนกริดที่ 168981 ให้ค่า  $Nu$  ที่ต่างจากการตีจำนวนกริดที่ 262968 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนถึง 2.76% ดังนั้นจึงเป็นที่มาให้เพิ่มจำนวนกริดขึ้นเป็น 460144 และเมื่อเปรียบเทียบค่า  $Nu$  ที่ จำนวนกริด 262968 กับ 460144 พบว่าให้ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.10% ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของจำนวนกริดเซลล์ต่อค่า  $f$  ที่  $Re=3,000$

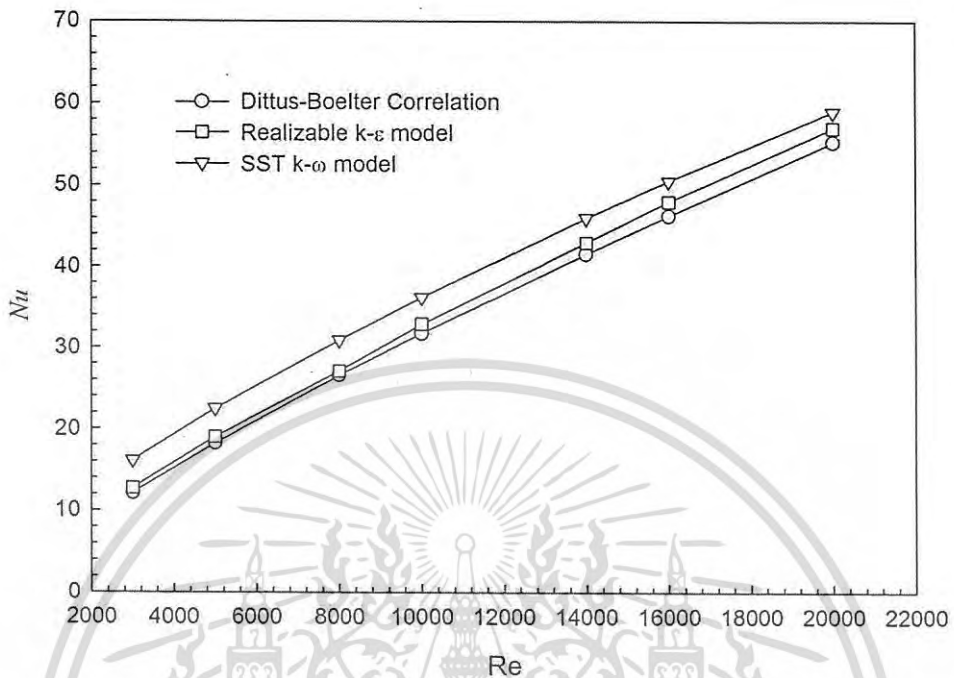
จากรูปที่ 4.15 ซึ่งให้เห็นว่าการตีจำนวนกริดที่ 168981 ให้ค่า  $f$  ที่ต่างจากการตีจำนวนกริดที่ 262968 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ 1.00% ดังนั้นจึงเป็นที่มาให้เพิ่มจำนวนกริดขึ้นเป็น 460144 และเมื่อเปรียบเทียบค่า  $f$  ที่ จำนวนกริด 262968 กับ 460144 พบว่าให้ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.19% ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้จำนวนกริดอยู่ในช่วง 262968 ในการศึกษาเพื่อเพิ่มความถูกต้องของค่าในการศึกษาและความแม่นยำให้มากขึ้น

#### 4.5 การเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลในท่อกลม

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable  $k-\varepsilon$  และ SST  $k-\omega$  สำหรับการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมผิวเรียบที่ไม่มีแหวนทรงกรวยใส่ภายใน โดยใช้กริดเซลล์ที่ได้จากการตรวจสอบในหัวข้อ 4.4 และใช้วิธีการคำนวณแบบเป็นโมดูล และวิเคราะห์การไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ 3,000 ถึง 20,000 และนำผลการคำนวณมาเปรียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter เพื่อวิเคราะห์ค่าของเลขนัสเซลท์ สมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter แสดงได้ดังนี้

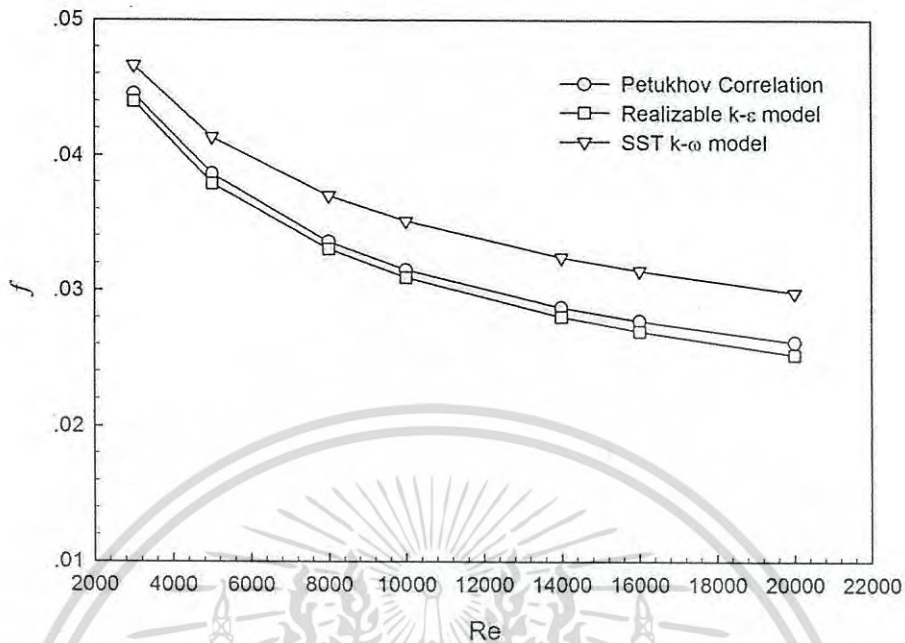
$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (4.6)$$

สมการนี้ได้รับการยืนยันจากผลการทดลองสำหรับช่วงของเงื่อนไขดังนี้คือ  $0.7 \leq Pr \leq 160$ ,  $Re \geq 10,000$  และ  $L_e/D \geq 10$  โดยที่  $L_e$  คือความยาวช่วงขาเข้า



รูปที่ 4.16 ค่าเลขนัสเซิลท์ของการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมผิวเรียบที่ไม่มีการใส่แหวนทรงกรวย

จากรูปที่ 4.16 ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable  $k-\epsilon$  ให้ค่าใกล้เคียงกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST  $k-\omega$  ซึ่งให้ค่าคลาดเคลื่อนสูงกว่า



รูปที่ 4.17 ค่าตัวประกอบความเสียดทานของการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ

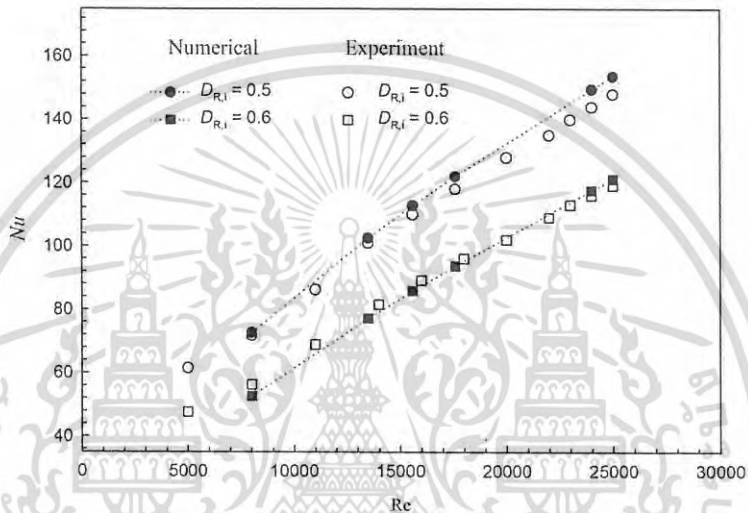
จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable  $k-\epsilon$  ให้ค่าใกล้เคียงกับสมการสหสัมพันธ์ของ Petukhov มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST  $k-\omega$  ซึ่งให้ค่าคลาดเคลื่อนสูงกว่า โดยเปรียบเทียบค่าของตัวประกอบความเสียดทานกับสมการสหสัมพันธ์ของ Petukhov ดังแสดงไว้ในสมการที่ (4.7)

$$f_0 = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad \text{เมื่อ } 3,000 \leq Re \leq 5 \times 10^6 \quad (4.7)$$

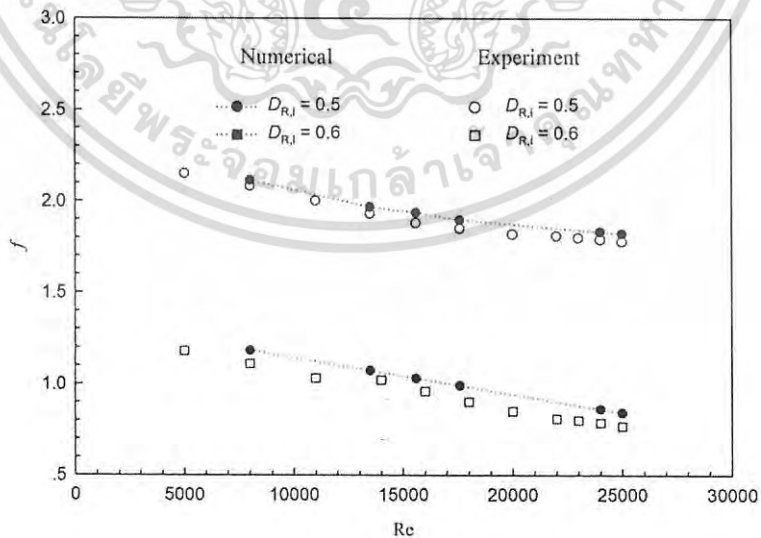
จากการศึกษาข้างต้นเมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable  $k-\epsilon$  และแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST  $k-\omega$  โดยวิเคราะห์ค่าเลขนัยสเกลต์ของการถ่ายเทความร้อนเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และค่าตัวประกอบความเสียดทานของการถ่ายเทความร้อนเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Petukhov พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable  $k-\epsilon$  เหมาะสมในการศึกษางานวิจัยนี้มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ SST  $k-\omega$  เนื่องจากให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎี ทั้งค่าเลขนัยสเกลต์ของการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียดทานของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการศึกษาของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable  $k-\epsilon$  ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 3.64% สำหรับค่าตัวประกอบเสียดทาน และสำหรับค่าเลขนัยสเกลต์ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 4.99%

#### 4.6 การเปรียบเทียบผลการศึกษาเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของการศึกษา ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขโดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลอง โดยทำการศึกษาที่ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม โดยจัดวางแหวนรูปกรวยแบบ convergent หรือจัดวางแหวนรูปกรวยแบบลูเข้า ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง ทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขของค่า  $N_{st}$  เชลท์มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 7.43 และให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าตัวประกอบเสียดทานอยู่ที่ 7.59



รูปที่ 4.18 ค่า  $N_{st}$  เชลท์ของการคำนวณเชิงตัวเลขและการทดลอง Promvong (2008)



รูปที่ 4.19 ค่าตัวประกอบความเสียดทานของการคำนวณเชิงตัวเลขและการทดลอง Promvong (2008)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 วิธีการดำเนินการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการทดสอบโดยการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข
2. สร้างแบบจำลองและทดสอบเพื่อหาจำนวนกริดที่เหมาะสมในการศึกษา
3. สร้างแบบจำลองและทดสอบเพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมในการศึกษาที่มีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุดเมื่อเทียบกับทฤษฎี
4. สร้างแบบจำลองและปรับปรุงแหวนทรงกรวยเพื่อหาค่าความดันตกคร่อม ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน โดยทดสอบที่เรย์โนลด์ 3000 เพื่อหารูปแบบการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่เหมาะสม
5. เลือกรูปแบบการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่เหมาะสมและปรับระยะพิตช์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก และทดสอบที่เรย์โนลด์ 3000 ถึง 20000 เพื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุดและลดลงช้าที่สุดเมื่อเพิ่มค่าเรย์โนลด์ให้สูงขึ้น
6. เก็บข้อมูลค่าความดันตกคร่อม ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของการทดสอบ
7. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้เพื่อเปรียบเทียบผลและเลือกรูปแบบการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ โดยวิเคราะห์จากค่าการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของเลขนัสเซิลท์ ค่าความดันตกคร่อมซึ่งอยู่ในรูปของตัวประกอบเสียดทาน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

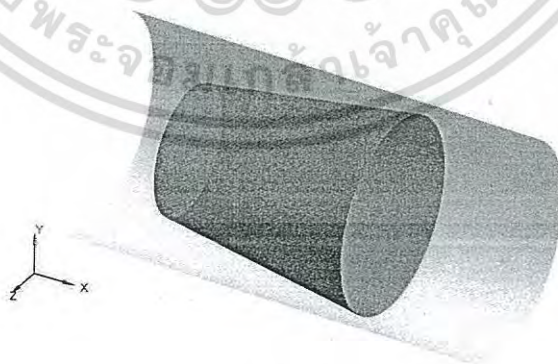
## ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมช่วยให้เพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบต่างๆ ที่ได้กล่าวมาในบทที่ 4 ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงผลจากการศึกษาด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหล, ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมสำหรับการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลม ซึ่งจะพิจารณาในส่วนของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยเป็นหลัก

การแสดงผลการศึกษาจะแสดงด้วยรูปภาพหรือกราฟเพื่อให้เห็นการเปรียบเทียบที่ชัดเจน ซึ่งจะแสดงผลและอภิปรายผลเกี่ยวกับ พฤติกรรมการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงแหวนทรงกรวยรูปทรงต่างๆ, การกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลม, กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ), กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ), และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) และอภิปรายผลเปรียบเทียบความแตกต่างและสรุปรูปแบบแหวนทรงกรวยที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น แหวนทรงกรวยที่ใส่ในท่อกลมแบบต่างๆ มีดังนี้

## 5.1 แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

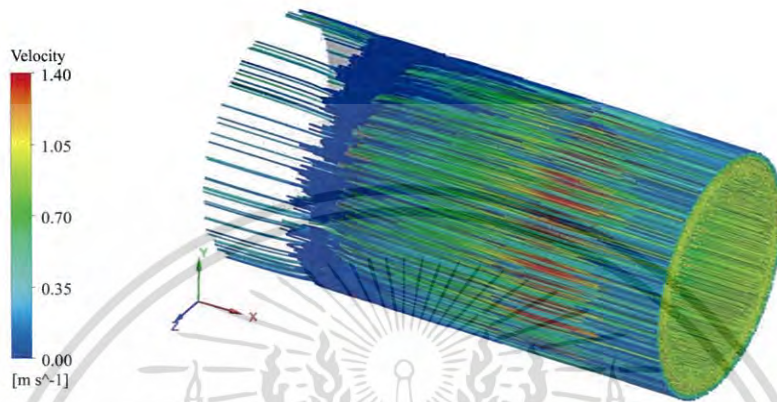
รูปแบบแรกที่ได้ทำการศึกษาคือใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลม โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบซี่ทวนกระแสการไหลหรือหันวงแหวนทรงกรวยเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กสวนกระแสการไหลของของไหล โดยกำหนดอัตราส่วนระยะพิทช์  $P_R=2.0$ , อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า  $D_{R_i}=0.6$ , อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R_o}=0.9, 0.95, 0.97$  ความยาวแหวนทรงกรวย  $L=50$  mm โดยการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมแสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

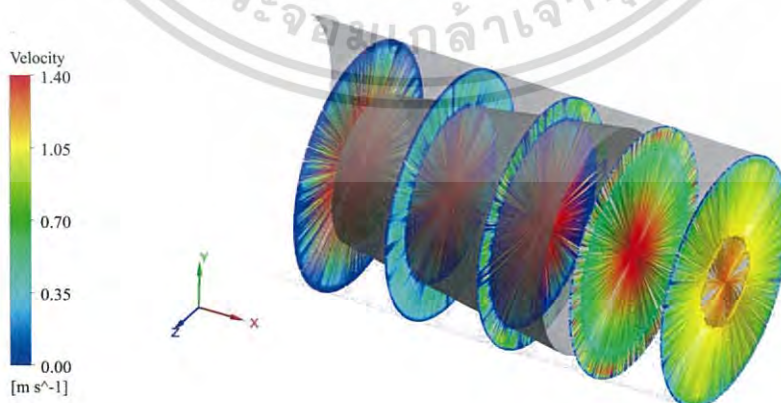
### 5.1.1 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

ในส่วนของเส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมจะแสดงในรูปแบบ 3 มิติ เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมผิวเรียบดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมแบบ 3 มิติ

จากรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมผิวเรียบ โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบไหลผ่านแหวนทรงกรวยทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนขึ้นสังเกตได้จากลักษณะการไหลเกิดการหมุนวนที่ด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวยแต่ยังไม่มากนักเนื่องจากกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในยังมีเส้นกระแสแบบเส้นตรงมากกว่าแบบหมุนวน เมื่อมองภาพในแนวระนาบจะเห็นได้ชัดเจนว่าการไหลเกิดกระแสการไหลแบบหมุนวนน้อยกว่าการไหลแบบเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

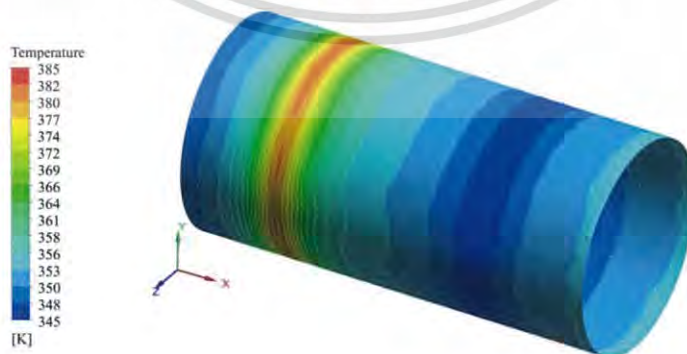


รูปที่ 5.4 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมที่แสดงในรูปของ core of vortex

จากรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นโครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมผิวเรียบ ซึ่งการแสดงผลได้แสดงในรูปของเปลือกทอหุ้มแกนการไหล core of vortex มาใช้ในการอธิบายโครงสร้างการไหล เนื่องจากการแสดงผลในลักษณะดังกล่าวสามารถอธิบายการไหลแบบหมุนวนและแสดงภาพให้เห็นได้ชัดเจนมากกว่าการแสดงผลพฤติกรรมการไหลในรูปแบบอื่นๆ จากรูปที่ 5.2 และ รูปที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการไหลเป็นไปในรูปแบบเดียวกัน คือ จากรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าการไหลหมุนวนที่ทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวยและเมื่อพิจารณารูปที่ 5.4 ทำให้ทราบว่าบริเวณที่มีการไหลหมุนวนเกิดขึ้นที่ทางด้านหน้าและด้านหลังของแหวนทรงกรวยจะเกิดเปลือกทอหุ้มหนาแน่นกว่าบริเวณอื่นๆ

### 5.1.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมจะพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ ซึ่งจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.5



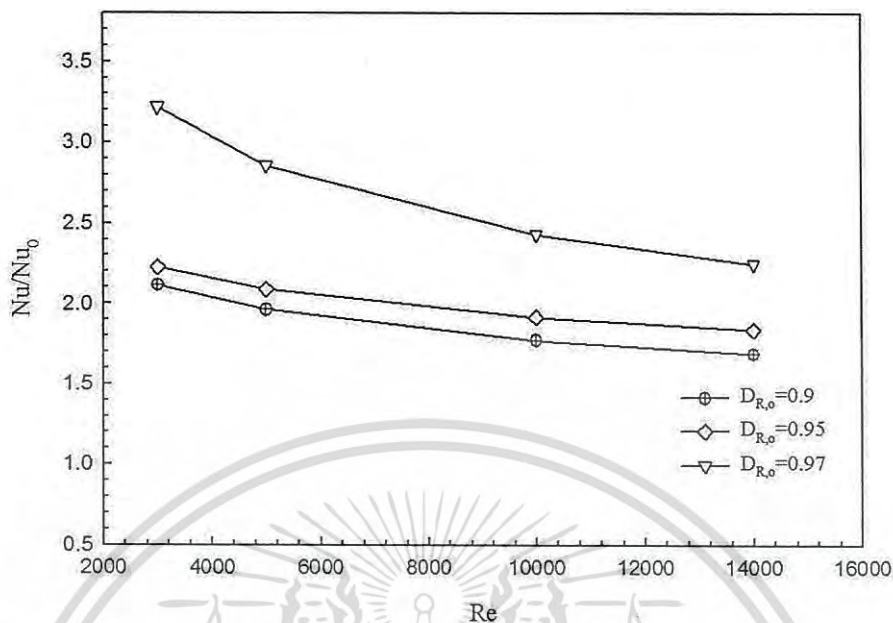
รูปที่ 5.5 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.5 แสดงถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนทรงกรวย  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อพิจารณาคอนทิวรัวของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้นสังเกตได้จากคอนทิวรัวสีฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนเป็นผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกับความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูง แต่อย่างไรก็ตามยังปรากฏคอนทิวรัวสีแดงบริเวณด้านหน้าหรือบริเวณทางเข้าของแหวนทรงกรวยแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่ทางเข้าแหวนทรงกรวยยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อยจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหลได้ และความปั่นป่วนของกระแสการไหลจะช่วยกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับผนังท่อสูงขึ้น โดยสังเกตจากคอนทิวรัวสีฟ้า แต่เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมก็ยังพบปัญหาการกระจายของอุณหภูมิจากบริเวณทางเข้าของแหวนทรงกรวยเนื่องจากยังมีการเกิดคอนทิวรัวสีแดงบริเวณด้านหน้าแสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทความร้อนบริเวณด้านหน้าหรือที่ทางเข้าแหวนทรงกรวยยังไม่มากนัก

รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมเมื่อใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $0.95$  และ  $0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ถึง  $14,000$  โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบขวางการไหลหรือชี้ทวนกระแสการไหล เมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแหวนทรงกรวยที่ทางออก ( $D_{R,o}$ ) ทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เพิ่มมากขึ้นและเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง โดยค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ที่ 3.21 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=14,000$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง อยู่ที่ 2.24 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 2.11 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 1.68 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 2.22 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและที่  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 1.83 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

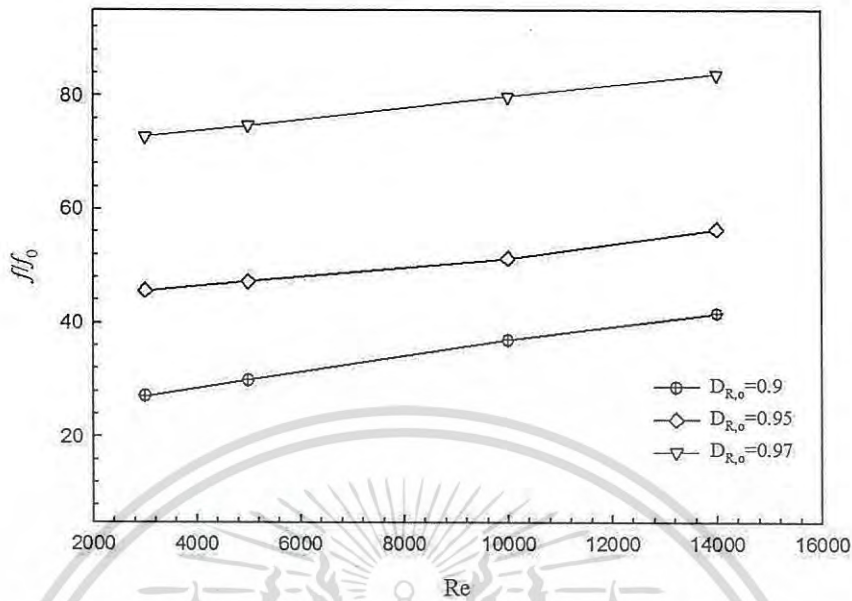


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

### 5.1.3 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) จากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก ( $D_{R,o}$ ) เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น และเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ พบว่าค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=14,000$  ซึ่งให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 83.8 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=3,000$  ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 72.8 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=3,000$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดที่ 27.1 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและที่  $Re=14,000$  ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 41.6 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 45.6 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 56.4 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ



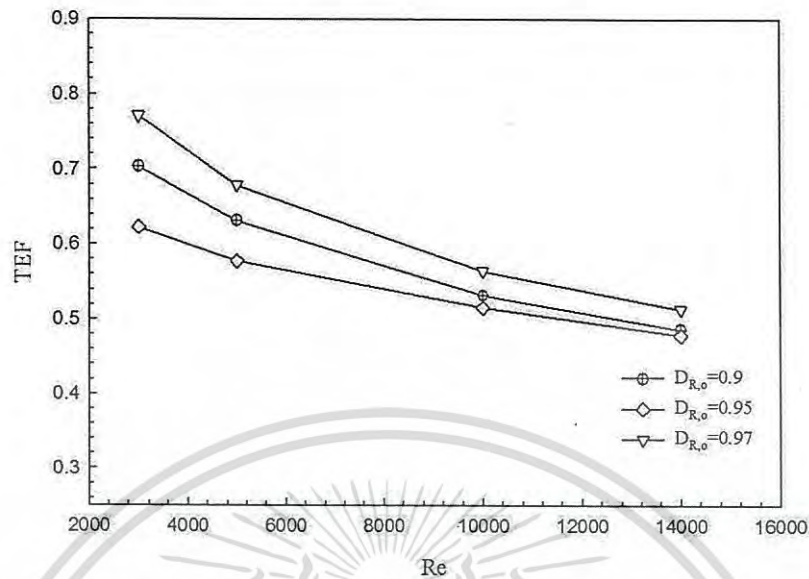
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) พบว่ามีความสัมพันธ์กันคือเมื่อเพิ่มเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแหวนทรงกรวยทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นและค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ก็เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน การใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมถึงจะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าแต่ก็ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่สูงมากเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนร่วมด้วยและเพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้แหวนทรงกรวยได้อย่างเหมาะสมและคุ้มค่าหรือไม่

#### 5.1.4 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับค่ากับเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมในท่อกลมผิวเรียบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.8

จากรูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม พบว่าที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ 0.77 เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 0.70 และที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 0.62

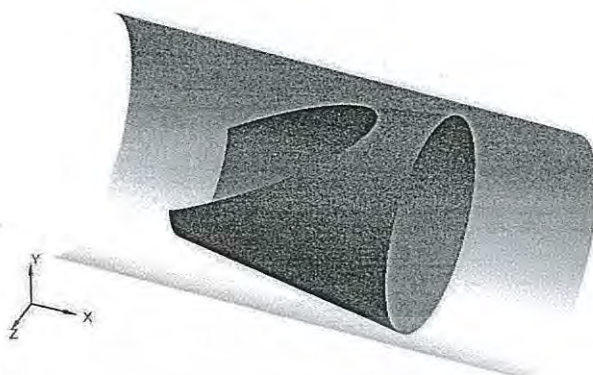


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

จากการพิจารณาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนพบว่าที่เพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R,o}=0.97$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดและรองลงมาคือ  $D_{R,o}=0.9$  และ  $0.95$  ตามลำดับ จากการพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก ( $D_{R,o}$ ) สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าประสิทธิภาพได้ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีปัญหาค่าตัวประกอบเสียดทานที่สูงขึ้นหลายเท่าตัว จึงเป็นสาเหตุหลักทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยมีค่าต่ำ นั่นหมายถึงว่า การใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่บริเวณผนังได้แต่ไม่คุ้มค่ากับการศึกษาและการลงทุนในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมไม่คุ้มค่ากับการลงทุนและการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพที่ยังมีค่าต่ำ ดังนั้นเราจึงต้องปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยเพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทานให้มีค่าลดลง เพื่อให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ด้วยหลักการนี้จึงเป็นเหตุผลหลักในการเลือกปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบต่างๆ

## 5.2 แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1

จากการศึกษาการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมทำให้ทราบว่าสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้แต่ยังมีปัญหาค่าตัวประกอบเสียดทานสูงและการกระจายของอุณหภูมิยังน้อยบริเวณด้านหน้าหรือบริเวณทางเข้าของแหวนทรงกรวย ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการปรับปรุงแหวนทรงกรวย 1 คือการตัดองศาที่ทางเข้าแหวนทรงกรวยดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

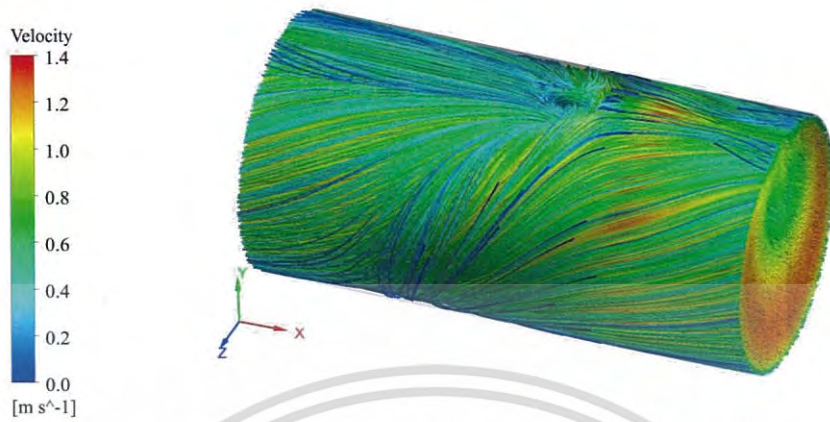
จากรูปที่ 5.9 เป็นรูปทรงของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ซึ่งการปรับปรุงรูปทรงจะทำให้การตัดต่อที่ด้านหน้าของแหวนทรงกรวย  $\alpha_1=30^\circ$  เพื่อให้การกระจายของอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นและช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทาน

การปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 1 ได้ทำการศึกษาที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า  $D_{R,i}=0.6$ , อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R,o}=0.9, 0.95, 0.97$ , อัตราส่วนระยะพิช  $P_R=2.0$  และ เลขเรย์โนลด์  $Re=3,000$  ถึง  $14,000$  เพื่อวิเคราะห์ค่าตัวประกอบเสียดทาน, ค่าการถ่ายเทความร้อน และค่าสมรรถนะเชิงความร้อน เมื่อทำการใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ภายในท่อกลมผิวเรียบและทำการเปรียบเทียบค่ากับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีการใส่แหวนทรงกรวยภายใน

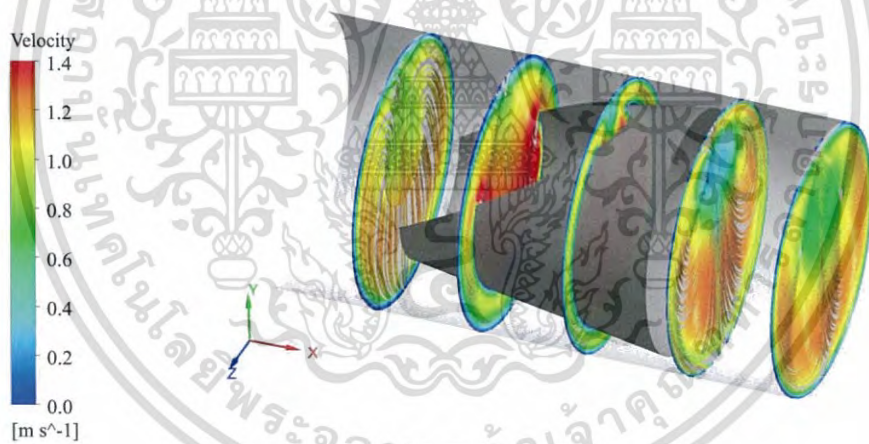
### 5.2.1 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 จะแสดงดังรูปที่ 5.10 เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของการไหลของของไหลทดสอบแบบ 3 มิติ

จากรูปที่ 5.10 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ และรูปที่ 5.11 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบทำให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงโดยตัดต่อที่ด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวย ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ทำให้ช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหลเกิดการไหลหมุนวนมากขึ้น และเมื่อมองภาพที่ 5.12 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ทำให้เห็นได้ชัดเจนขึ้นสำหรับกระแสการไหลแบบหมุนวนภายในท่อกลมเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) และเมื่อเปรียบเทียบกับการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม พบว่าการใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงโดยตัดต่อที่ด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวยทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนหรือการไหลหมุนวนมากกว่า และเมื่อพิจารณาโครงสร้างการไหลซึ่งแสดงผลในรูปของเปลือกห่อหุ้มแกนการไหล core of vortex มาใช้ในการอธิบายโครงสร้างการไหล จะเห็นการไหลแบบหมุนวนได้ชัดเจน จากรูปที่ 5.12 จะเกิดเปลือกห่อหุ้มหนาบริเวณที่ทางเข้าและทางออก เนื่องจากเกิดการไหลหมุนวนที่ทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวย

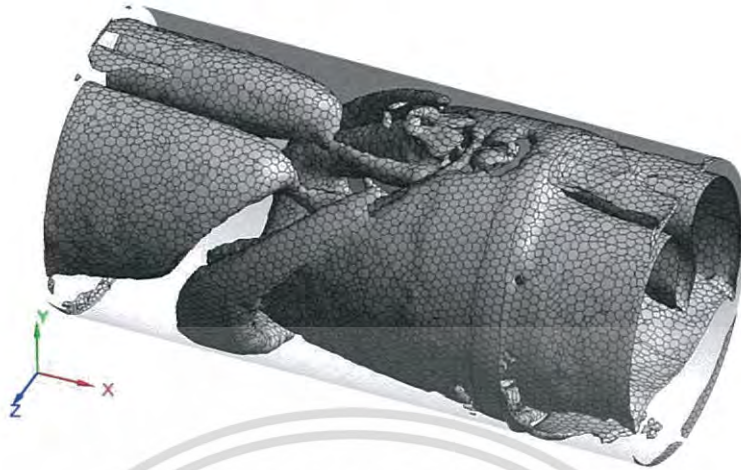


รูปที่ 5.10 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ )



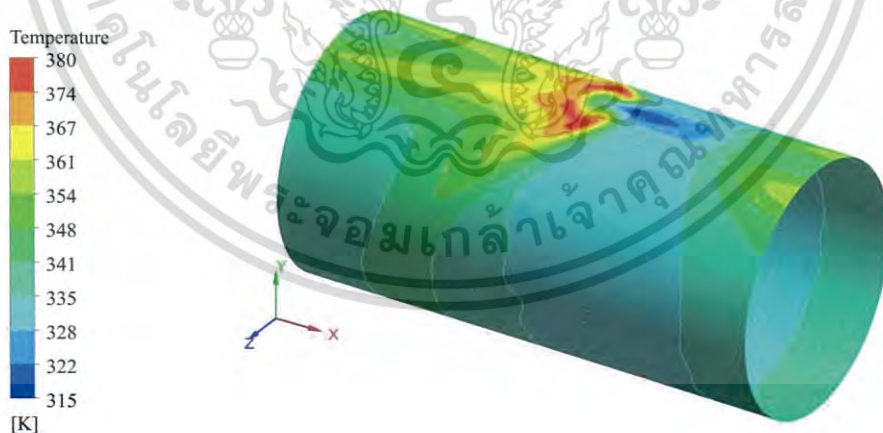
รูปที่ 5.11 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ซึ่งแสดงในรูปของ core of vortex

5.2.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ )  
การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ภายในท่อกลมผิวเรียบ เมื่อพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

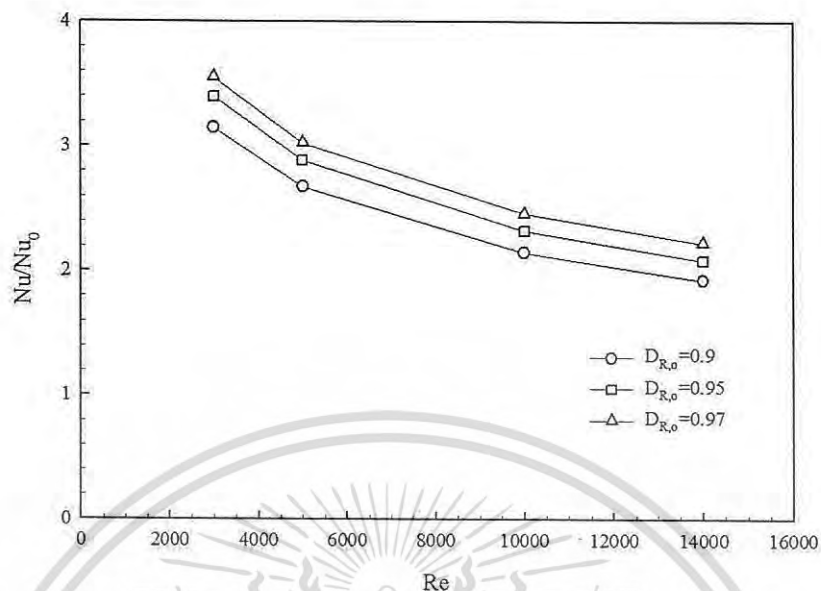
จากรูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนทรงกรวย  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 หรือแบบตัดตรงคาที่ด้านหน้าของแหวนทรงกรวย ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ภายในท่อกลมช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้นสังเกตได้จากคอนทัวร์สีเขียวและสีฟ้าที่มีมากขึ้นเนื่องจากเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนเป็นผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูงและบริเวณที่เกิดความปั่นป่วนหรือการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิที่บริเวณผนังท่อมากที่สุดคือบริเวณที่ปลายตัดตรงคาหรือบริเวณใกล้ทางออกของแหวนทรงกรวยซึ่งเห็นได้จากคอนทัวร์สีฟ้า แต่อย่างไรก็ตามยังปรากฏคอนทัวร์สีแดงบริเวณปลายตัดของทางเข้าแหวนทรงกรวยแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่ปลายตัดของทางเข้าแหวนทรงกรวยยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อยจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม การปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบตัดตรงคาที่ทางเข้าแหวนทรงกรวย ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ยังเกิดคอนทัวร์สีแดงน้อยกว่า

เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิจะเห็นได้ว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหลได้ และความปั่นป่วนของกระแสการไหลจะช่วยกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับผนังท่อมียค่าสูงขึ้น โดยสังเกตจากคอนทัวร์สีฟ้าและสีเขียวที่เกิดขึ้นบริเวณผนังท่อ

รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 เมื่อใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $\alpha_1=30^\circ$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $0.95$  และ  $0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ถึง  $14,000$  โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบขวางการไหลหรือชี้ทวนกระแสการไหล เมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก ( $D_{R,o}$ ) ทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เพิ่มมากขึ้นและเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง โดยค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ที่ 3.55 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=14,000$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง อยู่ที่ 2.22 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 3.39 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 2.08 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 3.14 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและที่  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 1.92 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

จากการพิจารณาข้างต้นที่  $Re=3,000$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก โดย  $D_{R,o}=0.9$ ,  $0.95$  และ  $0.97$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 3.14, 3.39 และ 3.55 ตามลำดับ การใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงกว่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

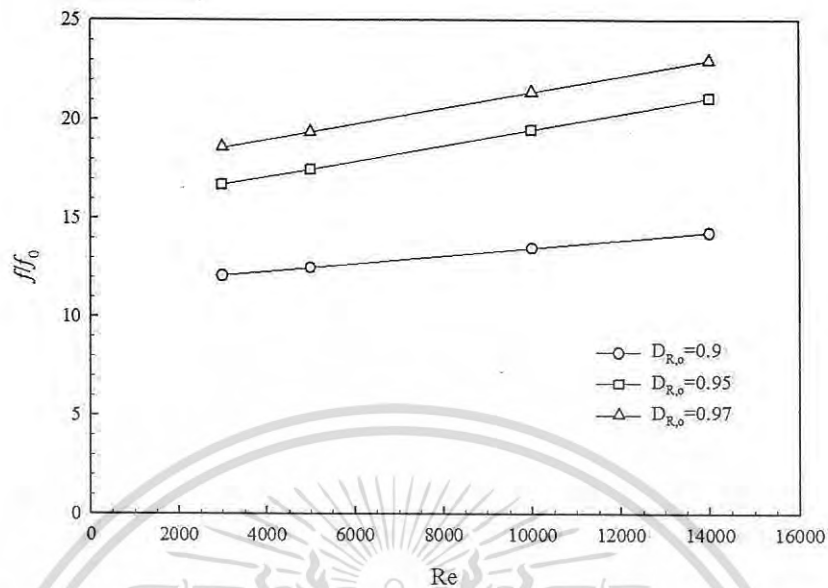


รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลท์ ( $Nu/Nu_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ ) ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_f=30^\circ$ )

### 5.2.3 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_f=30^\circ$ )

ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบตัดฉากที่ทางเข้าของแหวนทรงกรวย ( $\alpha_f=30^\circ$ ) หรือแบบปรับปรุงแบบที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 จากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก ( $D_{R,o}$ ) เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น และเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่เมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม การใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_f=30^\circ$ ) ให้ค่าน้อยกว่ามาก

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ( $f/f_0$ ) กับเลขเรย์ ( $Re$ ) เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 พบว่าค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 22.9 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 18.5 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=3,000$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดที่ 12.06 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและที่  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 14.2 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 16.6 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 21.08 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ



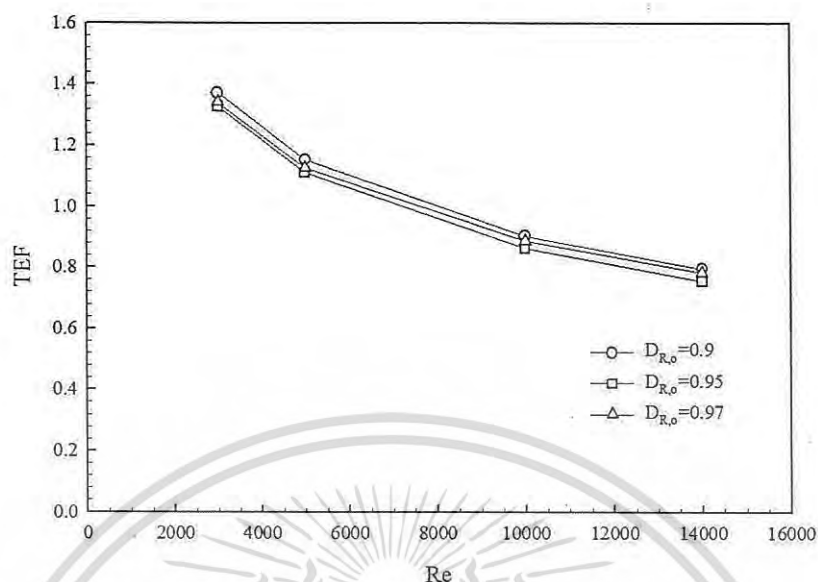
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับค่าอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนพบว่ามีความสัมพันธ์กันคือเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแหวนทรงกรวยทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นและค่าอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนก็เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน การใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงให้ค่าอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าและการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมแต่ก็ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานที่สูงมากเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนร่วมด้วยโดยค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจะพิจารณาในหัวข้อถัดไป

#### 5.2.4 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับค่าเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ในท่อกลมผิวเรียบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.16

จากรูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 พบว่าที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ 1.37 เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.34 และที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.32



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

จากการพิจารณาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนพบว่าที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R,o}=0.9$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดและรองลงมาคือ  $D_{R,o}=0.97$  และ 0.95 ตามลำดับ จากการพิจารณาค่าอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนในหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก ( $D_{R,o}$ ) สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าประสิทธิภาพได้ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีปัญหาค่าตัวประกอบเสียดทานที่สูงขึ้นหลายเท่าตัว จึงเป็นสาเหตุหลักทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยมีค่าต่ำ ดังนั้นการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 1 หรือตัดองศาที่ทางด้านหน้าของแหวนทรงกรวย ( $\alpha_1=30^\circ$ ) สามารถช่วยลดปัญหาค่าตัวประกอบเสียดทานได้ดังแสดงค่าในรูปที่ 5.15 เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

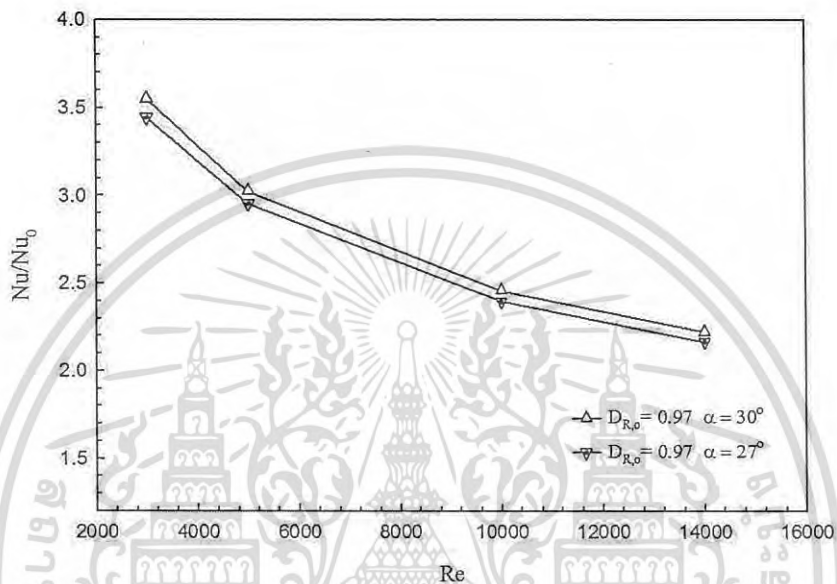
จากการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 1 โดยการตัดองศาที่ด้านหน้าของแหวนทรงกรวยจึงทำให้ทราบว่าการตัดมีผลช่วยให้ค่าตัวประกอบเสียดทานลดลง จึงได้ทำการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 1 โดยเพิ่มองศาในการตัดเป็น ( $\alpha_1=27^\circ$ ) ที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ถึง 14,000 เพื่อดูผลว่าเป็นอย่างไรเมื่อตัดองศามากขึ้น

### 5.2.5 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=27^\circ$ )

จากรูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 เมื่อใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $\alpha_1=27^\circ$  และ  $30^\circ$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ถึง 14,000 โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบขวางการไหลหรือชี้ทวนกระแสการไหล เมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่มการตัดองศาของแหวนทรงกรวยที่ทางด้านหน้าหรือทางเข้าทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ลดลงเมื่อเทียบกับการปรุงแหวนทรงกรวย 1 ที่  $\alpha_1=30^\circ$  และเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ลดลง เมื่อพิจารณาที่  $\alpha_1=27^\circ$  ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์สูงสุดอยู่ที่ 3.44 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re=3,000$  เมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=14,000$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ลดลง อยู่ที่ 2.16 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์ที่  $\alpha_1=30^\circ$  พบว่ามีค่าลดลงมากที่สุดที่ 2.59% ซึ่งมีค่าลดลงน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าตัวประกอบเสียดทานที่ลดลงด้วยเช่นกัน

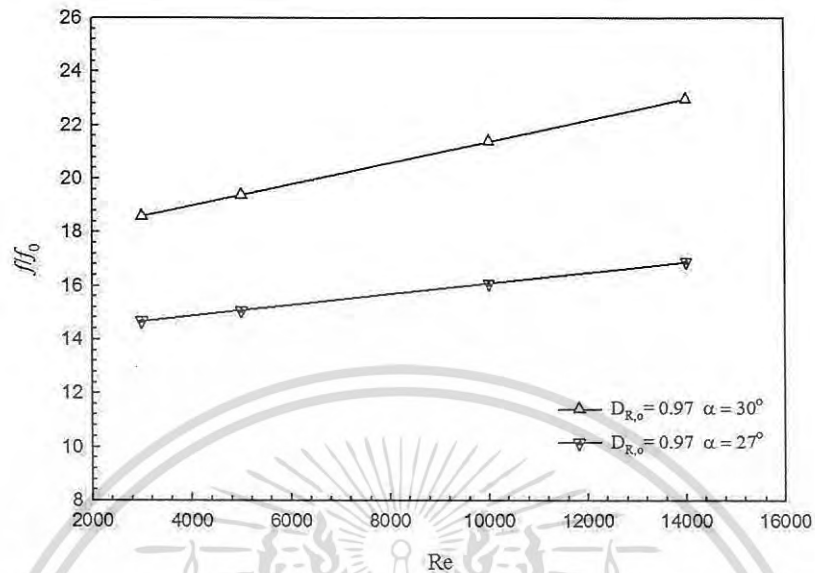


รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=27^\circ, 30^\circ$ )

#### 5.2.6 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=27^\circ$ )

ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบตัดฉากที่ทางเข้าของแหวนทรงกรวยที่มุม ( $\alpha_1=27^\circ$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 5.18 จากกราฟพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่มุม ( $\alpha_1=30^\circ$ ) การตัดฉากให้มีขนาดเล็กส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลงมาก และเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ที่มุม ( $\alpha_1=30^\circ$ ) การใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ที่มุม ( $\alpha_1=27^\circ$ ) ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยกว่ามาก ซึ่งน้อยลงมากที่สุดถึง 26.54% เมื่อเทียบกับการใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ที่มุม ( $\alpha_1=30^\circ$ )

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ที่มุม ( $\alpha_1=27^\circ$ ) พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดที่  $D_{R,i}=0.6, D_{R,o}=0.97, P_R=2.0$  และ  $Re=14,000$  ค่าตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 16.8 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=3,000$  ค่าตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 14.6 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ



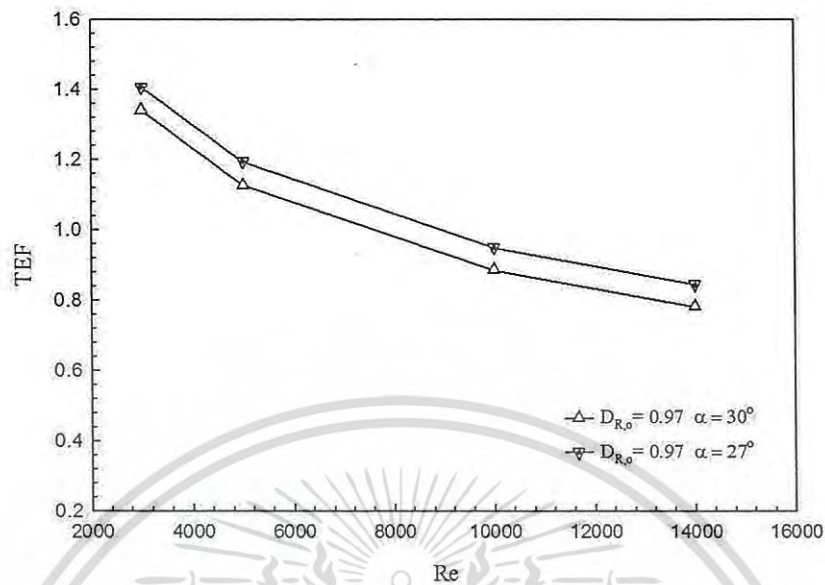
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=27^\circ, 30^\circ$ )

### 5.2.7 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=27^\circ$ )

ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับค่ากับเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ที่มุม ( $\alpha_1=27^\circ, 30^\circ$ ) ในท่อกลมผิวเรียบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.19

จากรูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ที่มุม ( $\alpha_1=27^\circ$ ) พบว่าที่  $Re=3,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ 1.40 และเมื่อพิจารณาที่  $Re=14,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 0.84

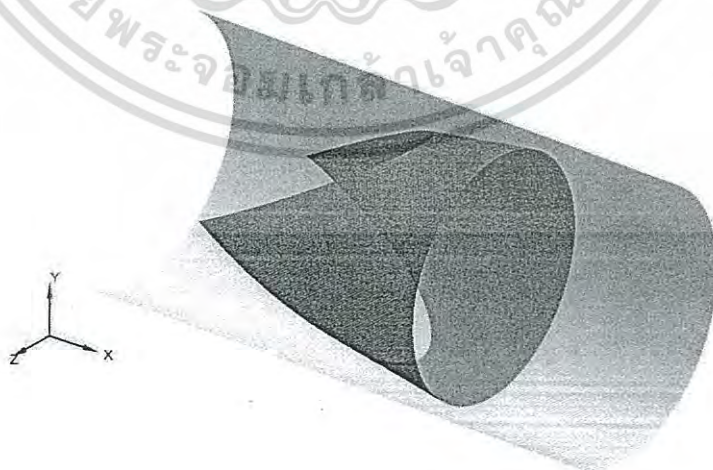
เมื่อพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ที่มุม ( $\alpha_1=27^\circ, 30^\circ$ ) จากรูปที่ 5.19 แสดงให้เห็นว่าการตัดองศาให้มีขนาดเล็กลงมีผลทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ถึงแม้ว่าการตัดองศาให้มีขนาดเล็กลงมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์มีค่าลดลง แต่เมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่ลดลงด้วยนั้นถือว่าการตัดองศาให้มีขนาดเล็กลงมีผลดีกว่า ซึ่งได้ชี้ให้เห็นชัดเจนดังกราฟที่แสดงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อตัดองศาที่มุม ( $\alpha_1=27^\circ$  และ  $30^\circ$ ) การตัดองศาให้มีขนาดเล็กลงทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น สูงสุดถึง 7.95%



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=27^\circ, 30^\circ$ )

### 5.3 แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2

จากการศึกษาการใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 เมื่อพิจารณาการตัดองศาให้มีขนาดเล็กลงจากมุม  $\alpha_1=30^\circ$  เป็น  $27^\circ$  ช่วยลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียได้และยังช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนได้อีกด้วย ซึ่งการปรับปรุงแหวนทรงกรวยโดยการตัดองศาที่ทางเข้าแหวนทรงกรวยเป็นรูปตัววีจะช่วยให้เพิ่มองศาในการตัดมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการปรับปรุงแหวนทรงกรวย 2 (รูปตัววีด้านหน้า) เพื่อช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานและเพิ่มองศาในการตัด ดังแสดงในรูปที่ 5.18



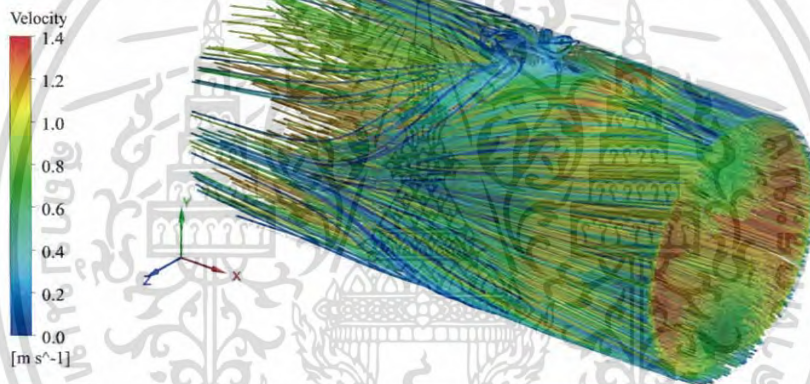
รูปที่ 5.20 รูปทรงของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

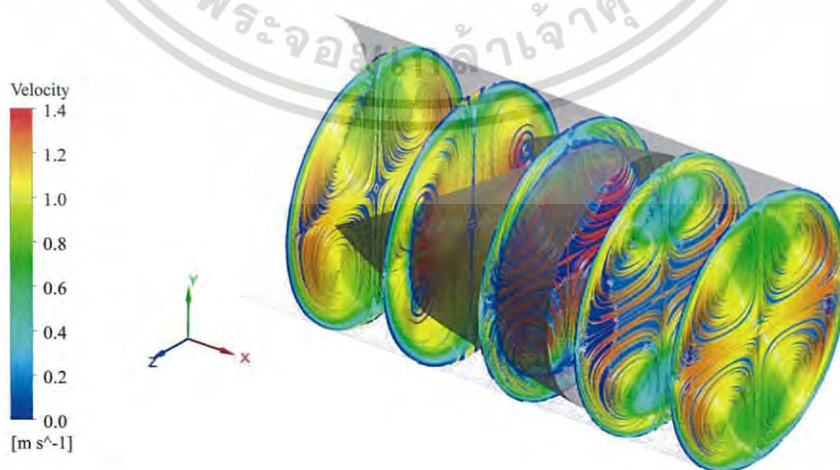
### 5.3.1 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 จะแสดงดังรูปที่ 5.19 เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของการไหลของของไหลทดสอบแบบ 3 มิติ

จากรูปที่ 5.21 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ และรูปที่ 5.22 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบทำให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงโดยตัดองศาที่ด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวยเป็นแบบรูปตัววี ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ทำให้ช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลเกิดการไหลหมุนวนมากขึ้น และเมื่อมองภาพที่ 5.21 จะเห็นโครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ที่มุม ( $\alpha_1=30^\circ$ ) โดยแสดงในรูปของ core of vortex ทำให้เห็นได้ชัดเจนขึ้นสำหรับพฤติกรรมการไหลแบบหมุนวนภายในท่อกลมเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม พบว่าการใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุงโดยการตัดองศาที่ด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวยเป็นรูปตัววี ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนหรือการไหลหมุนวนมากกว่า



รูปที่ 5.21 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ )



รูปที่ 5.22 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) โดยแสดงในรูปของ core of vortex

### 5.3.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 หรือการตัดรูปตัววีที่ทางเข้าแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมเมื่อพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

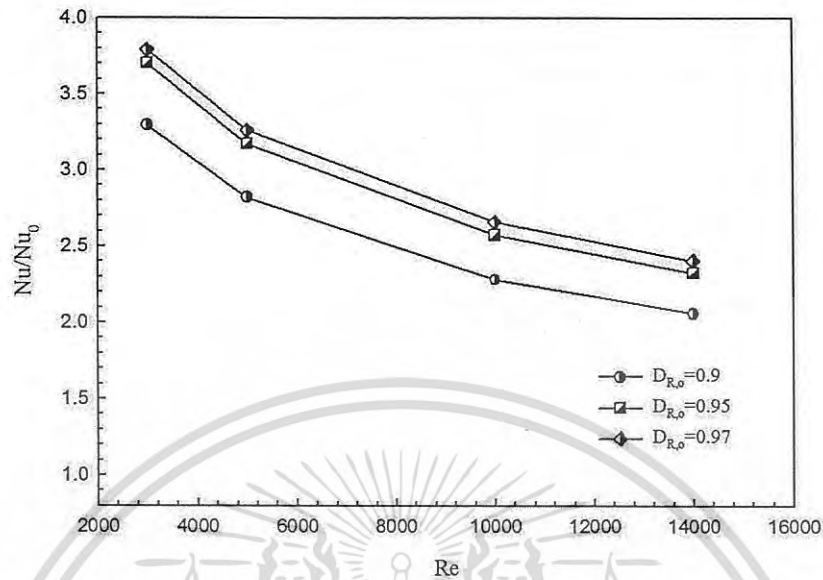
จากรูปที่ 5.24 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนทรงกรวย  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 หรือแบบตัดตอศาคาที่ด้านหน้าของแหวนทรงกรวยเป็นรูปเอกสาร์นี้เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัววี ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ภายในท่อกลมช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้นสังเกตได้จากคอนทัวร์สีเขียว และสีฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 (รูปตัววีด้านหน้า) ทำให้การไหลเกิดความปั่นป่วนเป็นผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกับความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูงและบริเวณที่เกิดความปั่นป่วนหรือการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิที่บริเวณผนังท่อน้อยที่สุดคือบริเวณที่ปลายตัดของแหวนทรงกรวยซึ่งเห็นได้จากคอนทัวร์แดง (รูปทรงเกือกม้า) แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่ปลายตัดของทางเข้าแหวนทรงกรวยยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อยจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรวยใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบตัดของขาที่ทางเข้าแหวนทรงกรวยเป็นรูปตัววี ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ยังเกิดคอนทัวร์สีแดงน้อยกว่า

เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิจะเห็นได้ว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 (รูปตัววีด้านหน้า) ภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหลได้และความปั่นป่วนของกระแสการไหลจะช่วยกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับผนังท่อดีขึ้น โดยสังเกตจากคอนทัวร์สีเขียวที่เกิดขึ้นบริเวณผนังท่อ

รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 เมื่อใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่มุม  $\alpha_1=30^\circ$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $0.95$  และ  $0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ถึง  $14,000$  โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบขวางการไหลหรือชี้ทวนกระแสการไหล เมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก ( $D_{R,o}$ ) ทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์เพิ่มมากขึ้นและเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์ลดลง โดยค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์สูงสุดอยู่ที่ 3.79 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=14,000$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์ลดลง อยู่ที่ 2.40 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์เท่ากับ 3.70 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์เท่ากับ 2.32 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์เท่ากับ 3.29 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและที่  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์เท่ากับ 2.05 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

จากการพิจารณาข้างต้นที่  $Re=3,000$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกโดย  $D_{R,o}=0.9$ ,  $0.95$  และ  $0.97$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์เท่ากับ 3.29, 3.70 และ 3.79 ตามลำดับ การใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 (รูปตัววีด้านหน้า) ให้ค่าอัตราส่วนเลขนีสเซลท์สูงกว่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงแหวนทรงกรวย 1

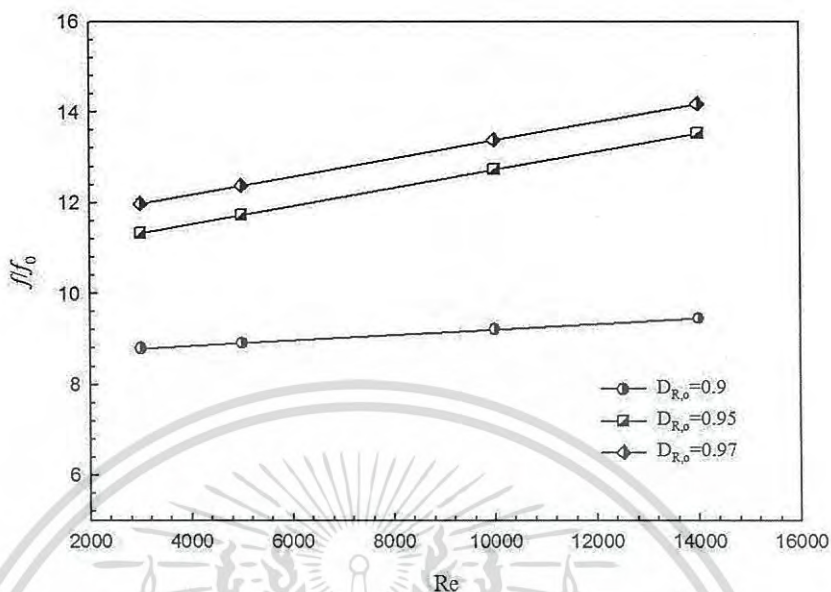


รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

### 5.3.3 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบตัดฉากที่ทางเข้าของแหวนทรงกรวยแบบรูปตัววี ( $\alpha_1=30^\circ$ ) หรือแบบปรับปรุงแหวนทรงกรวย 2 แสดงได้ดังรูปที่ 5.26

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 พบว่าค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 14.18 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 11.98 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=3,000$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดที่ 8.79 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและที่  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 9.45 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่า และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 11.33 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=14,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 13.53 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ



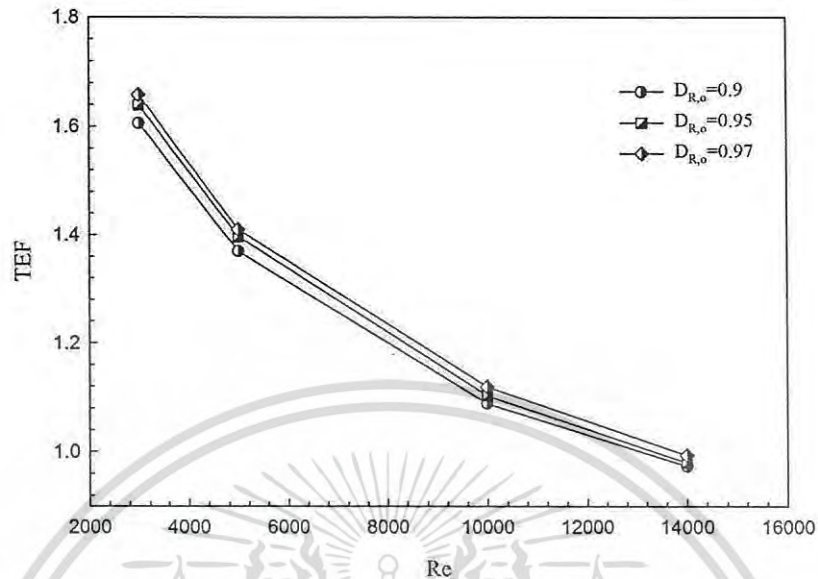
รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

### 5.3.4 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับค่ากับเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ในท่อกลมผิวเรียบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.27

จากรูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 (รูปตัดวี่ด้านหน้า) พบว่าที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2$  และ  $Re=3,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ 1.65 เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.64 และที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.59

จากการพิจารณาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนพบว่าที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออก  $D_{R,i}=0.97$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 1.65 และรองลงมาคือ  $D_{R,o}=0.95$  และ 0.9 เท่ากับ 1.64 และ 1.59 ตามลำดับ จากการพิจารณาการตัดองศาที่ทางด้านหน้าของแหวนทรงกรวยแบบรูปตัดวี่ ( $\alpha_1=30^\circ$ ) สามารถช่วยลดปัญหาอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานได้ดังแสดงค่าในรูปที่ 5.24 เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

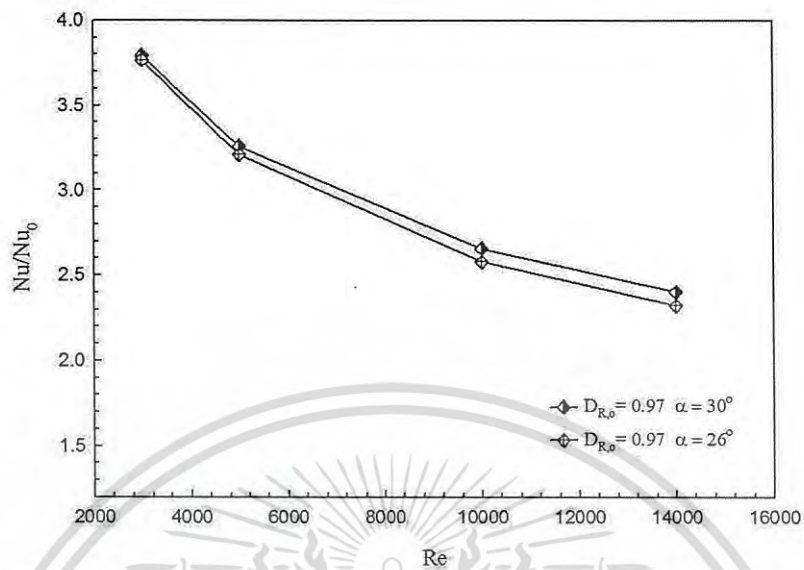


รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ )

จากการปรับปรุงแบบที่ 2 โดยการตัดองศาที่ด้านหน้าของแหวนทรงกรวยแบบรูปตัววีทำให้สามารถตัดองศาให้มีขนาดเล็กลงได้ถึง ( $\alpha_1=26^\circ$ ) ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ถึง  $14,000$  ในหัวข้อถัดไปเพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทานและเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อน

### 5.3.5 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=26^\circ$ )

จากรูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 เมื่อใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่มุม  $\alpha_1=26^\circ$  และ  $30^\circ$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ถึง  $14,000$  โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบขวางการไหลหรือชี้ทวนกระแสการไหล เมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าเมื่อตัดองศาของแหวนทรงกรวยที่ทางด้านหน้าหรือทางเข้าให้มีขนาดเล็กลง ( $\alpha_1=26^\circ$ ) ทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ลดลงเมื่อเทียบกับ ( $\alpha_1=30^\circ$ ) และเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ลดลง เมื่อพิจารณาที่ ( $\alpha_1=26^\circ$ ) ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์สูงสุดอยู่ที่ 3.76 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $Re=3,000$  เมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=14,000$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ลดลง อยู่ที่ 2.32 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ที่ ( $\alpha_1=30^\circ$ ) พบว่ามีค่าลดลงมากที่สุดที่ 3.40% ซึ่งมีค่าลดลงน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่ลดลงด้วยเช่นกัน

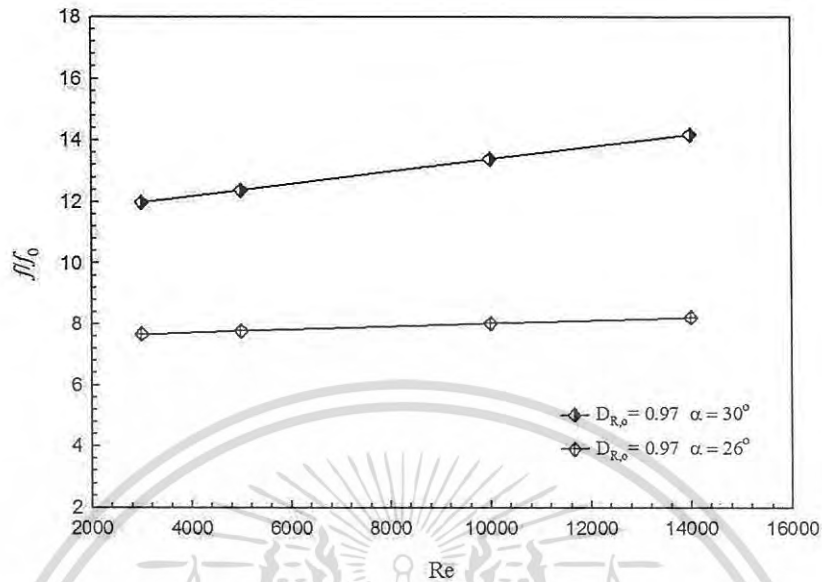


รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=26^\circ, 30^\circ$ )

### 5.3.6 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=26^\circ$ )

ค่าตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบตัดองศาที่ทางเข้าของแหวนทรงกรวยแบบรูปตัววี ( $\alpha_1=26^\circ$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 5.29 จากกราฟพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับการปรับปรุงที่มุม ( $\alpha_1=30^\circ$ ) การตัดองศาให้มีขนาดเล็กส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลงมาก และเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ที่มุม ( $\alpha_1=30^\circ$ ) การใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ที่มุม ( $\alpha_1=26^\circ$ ) ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยกว่ามาก ซึ่งน้อยลงมากที่สุดถึง 44.1% เมื่อเทียบกับการใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ที่มุม ( $\alpha_1=30^\circ$ )

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ที่มุม ( $\alpha_1=26^\circ$ ) พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดที่  $D_{R,i}=0.6, D_{R,o}=0.97, P_R=2.0$  และ  $Re=14,000$  ค่าตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 8.22 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=3,000$  ค่าตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 7.67 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ



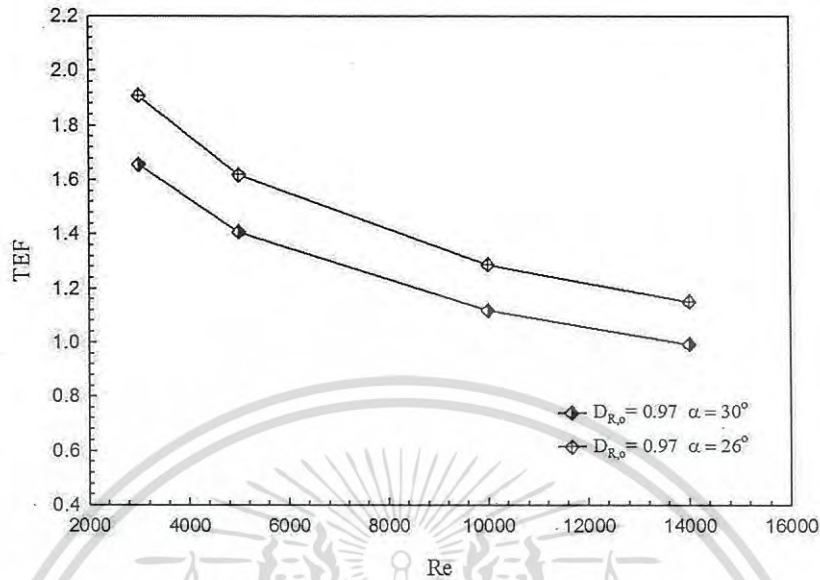
รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=26^\circ, 30^\circ$ )

### 5.3.7 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=26^\circ$ )

ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับค่าเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ที่มุม ( $\alpha_1=26^\circ, 30^\circ$ ) ในที่อุณหภูมิเรียบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.30

จากรูปที่ 5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ที่มุม ( $\alpha_1=26^\circ$ ) พบว่าที่  $Re=3,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ 1.90 และเมื่อพิจารณาที่  $Re=14,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.15

เมื่อพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ที่มุม ( $\alpha_1=26^\circ$  และ  $30^\circ$ ) จากรูปที่ 5.30 แสดงให้เห็นว่าการตัดตองศาให้มีขนาดเล็กลงมีผลทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ถึงแม้ว่าการตัดตองศาให้มีขนาดเล็กลงมีผลทำให้ค่าเลขนัสเซลที่มีค่าลดลง แต่เมื่อเทียบกับค่าตัวประกอบเสียดทานที่ลดลงด้วยนั้นถือว่าการตัดตองศาให้มีขนาดเล็กลงมีผลดีมากกว่า ซึ่งได้ชี้ให้เห็นชัดเจนดังกราฟที่แสดงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อตัดตองศาที่มุม ( $\alpha_1=26^\circ$  และ  $30^\circ$ ) การตัดตองศาให้มีขนาดเล็กลงทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น สูงสุดถึง 15.85%

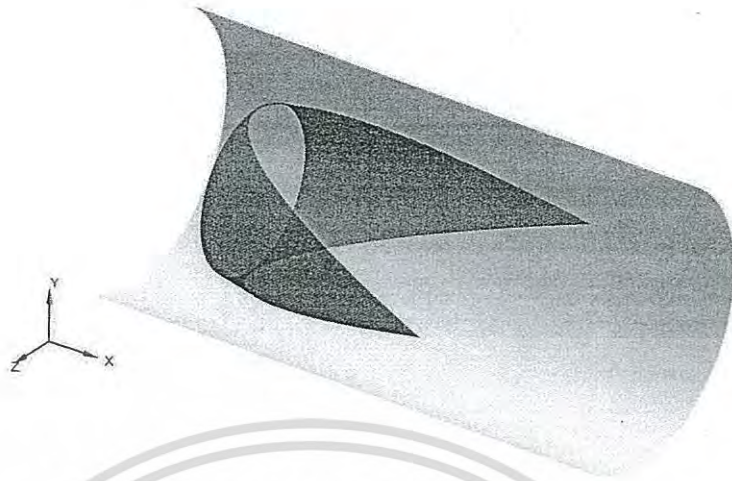


รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=26^\circ, 30^\circ$ )

#### 5.4 แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3

จากการศึกษาการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่ผ่านมาจึงทำให้ทราบว่า การตัดตองศา มีผลกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งช่วยให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลงและช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนได้อีกด้วย

แต่เนื่องจากการตัดตองศาที่ด้านหน้าแหวนทรงกรวยยังไม่สามารถตัดตองศาได้มากนักและยังเกิดเงามืดบริเวณปลายตองศาหรือการถ่ายเทความร้อนบริเวณนั้นยังไม่ดีมากนัก จึงเป็นที่มาของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 3 (รูปตัววีด้านหลัง) เนื่องจากเมื่อทดสอบการตัดตองศาที่ด้านหลังของแหวนทรงกรวยแบบรูปตัววีสามารถตัดตองศาให้เล็กลงได้มากกว่าที่มุม  $\alpha_2=30^\circ$  และเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการไหล, ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน, ค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเป็นอย่างไรบ้างเมื่อเปลี่ยนด้าน ในการตัดตองศา และวิเคราะห์การปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 3 (รูปตัววีด้านหลัง) ตัดตองศาที่มุม  $\alpha_2=17^\circ$  มีผลอย่างไรบ้างกับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน, ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและค่าสมรรถนะเชิงความร้อน ลักษณะการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 3 แสดงไว้ดังรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.31 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ )

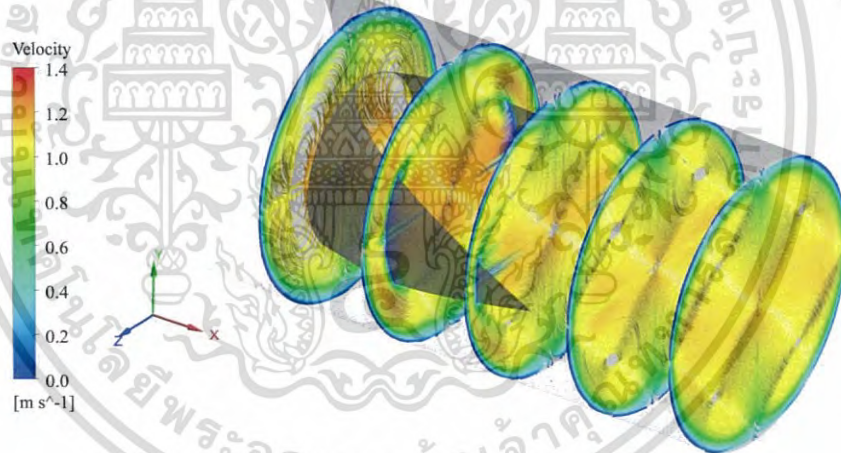
#### 5.4.1 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ )

เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 จะแสดงดังรูปที่ 5.32 เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของการไหลของของไหลทดสอบแบบ 3 มิติ

จากรูปที่ 5.32 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ และรูปที่ 5.33 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบทำให้ทราบว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงโดยตัดองศาที่ด้านทางออกของแหวนทรงกรวยเป็นแบบรูปตัววี ( $\alpha_2=17^\circ$ ) ทำให้ช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลเกิดการไหลหมุนวนมากขึ้น และเมื่อมองภาพที่ 5.34 เส้นกระแสการไหลแบบ 2 มิติจะเห็นโครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ที่มุม ( $\alpha_2=17^\circ$ ) โดยแสดงในรูปของ core of vortex เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของการไหลแบบหมุนวนภายในท่อกลมเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมพบว่า การปรับปรุงแหวนทรงกรวย 3 ทำให้เกิดการไหลหมุนวนมากกว่าและเมื่อเปรียบเทียบกับแบบปรับปรุง 1 และ 2 พบว่าการใส่แหวนทรงกรวยปรับปรุง 3 โดยการตัดองศาที่ด้านทางออกของแหวนทรงกรวยเป็นรูปตัววี ( $\alpha_2=17^\circ$ ) ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนหรือการไหลหมุนวนไม่ต่างกับการปรับปรุงแหวนทรงกรวย 1 และ 2 มากนัก

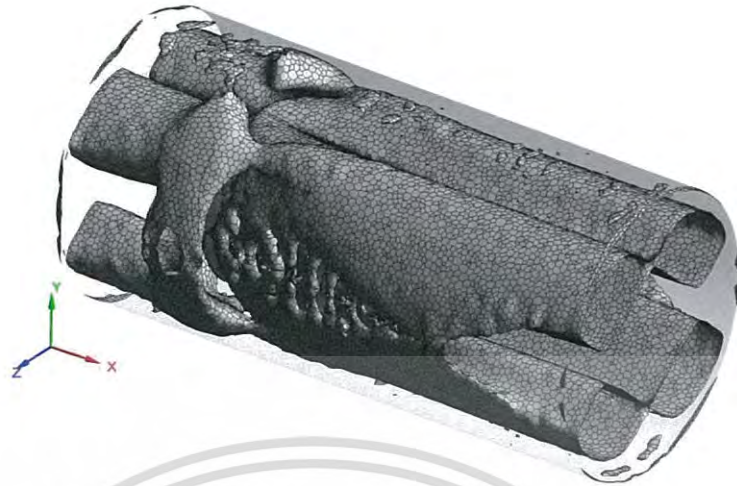


รูปที่ 5.32 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ )



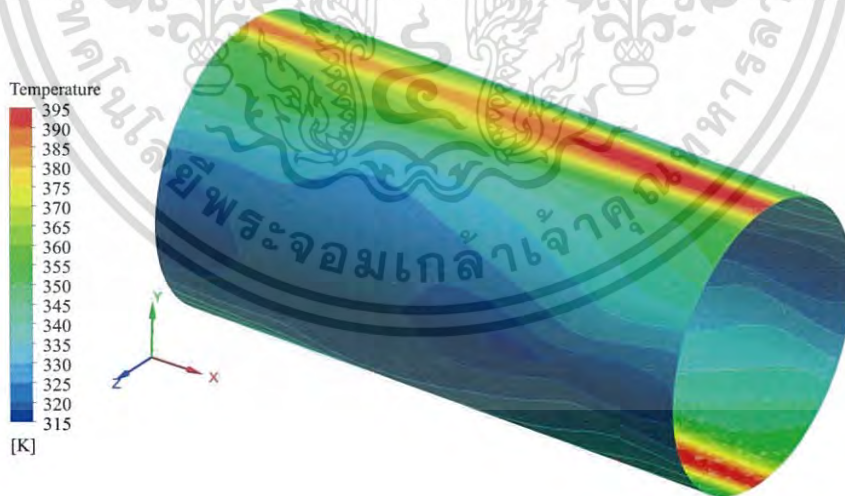
รูปที่ 5.33 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ ) ซึ่งแสดงในรูปของ core of vortex

5.4.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ )  
 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 หรือการตัดรูปตัววีด้านทางออกของแหวนทรงกรวยภายในทอกลมเมื่อพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.35



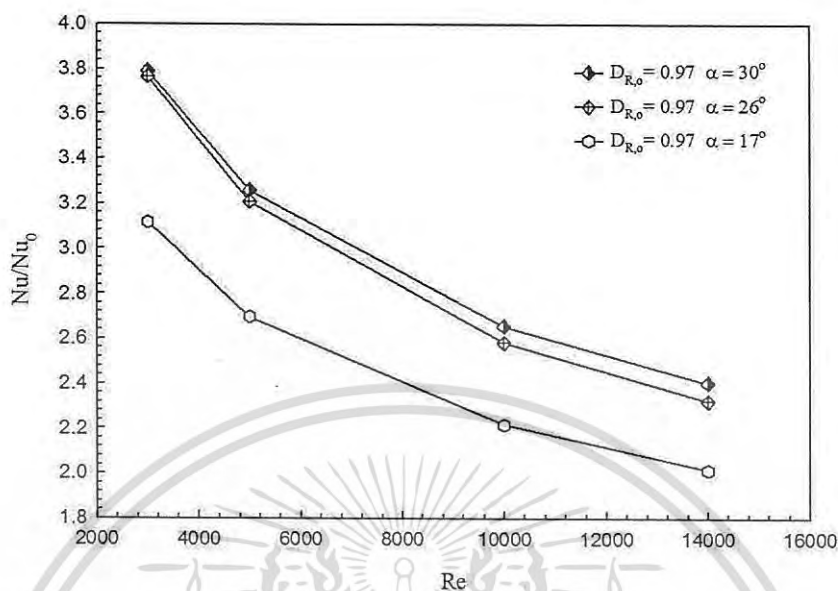
รูปที่ 5.35 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.35 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนทรงกรวย  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2$  และ  $Re=3,000$  เมื่อพิจารณาคอนทอร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 หรือรูปตัววีที่ด้านทางออกของแหวนทรงกรวย ( $\alpha_2=17^\circ$ ) ภายในท่อกลมช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้นสังเกตได้จากคอนทอร์สีเขียวและสีฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกับความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูงและบริเวณที่เกิดความปั่นป่วนหรือการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิที่บริเวณผนังท่อน้อยที่สุดคือบริเวณที่ปลายตัดของแหวนทรงกรวยซึ่งเห็นได้จากคอนทอร์แดงยาวตลอดแนวการตัดของแหวน แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่ปลายตัดของทางออกแหวนทรงกรวยยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อยจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

เมื่อพิจารณาคอนทอร์ของการกระจายอุณหภูมิจะเห็นได้ว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มการกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับผนังท่อน้อยขึ้น โดยสังเกตจากคอนทอร์สีเขียวและสีฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผนังท่อ

รูปที่ 5.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 เมื่อใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่  $\alpha_2=17^\circ$ ,  $\alpha_1=26^\circ$  และ  $\alpha_1=30^\circ$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $0.95$  และ  $0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ถึง  $14,000$  โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบขวางการไหลหรือชี้ทวนกระแสการไหล เมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก ( $D_{R,o}$ ) ทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เพิ่มมากขึ้นและเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง และการตัดของคามีผลทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง และเมื่อพิจารณาที่  $\alpha_2 = 17^\circ$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ที่ 3.11 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=14,000$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง อยู่ที่ 2.01 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อพิจารณาที่  $\alpha_1=26^\circ$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ที่ 3.76 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=14,000$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง อยู่ที่ 2.32 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อพิจารณาที่  $\alpha_1=30^\circ$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ที่ 3.79 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=14,000$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง อยู่ที่ 2.40 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ



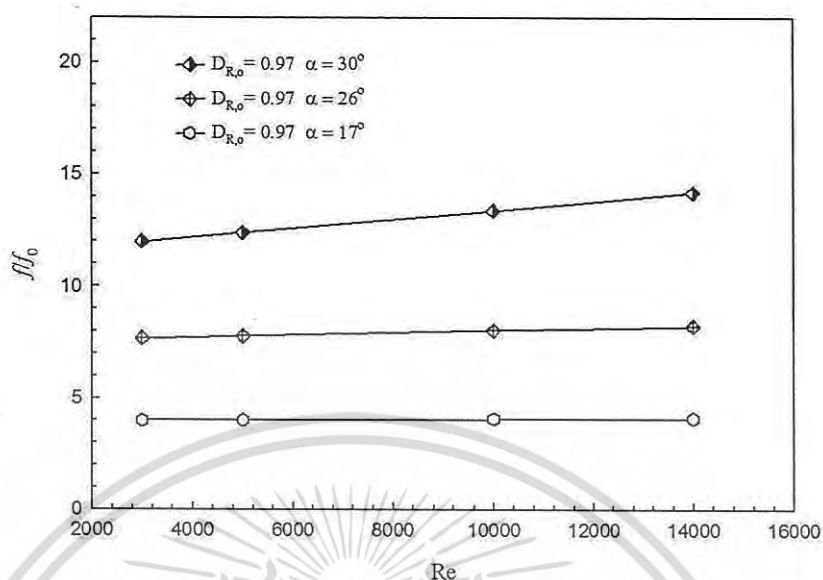
รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 และ 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ ,  $\alpha_1=26^\circ$  และ  $\alpha_1=30^\circ$ )

#### 5.4.3 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ )

ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบตัดองศาที่ทางออกของแหวนทรงกรวยแบบรูปตัววี ( $\alpha_2=17^\circ$ ) หรือแบบปรับปรุง 3 และเปรียบเทียบกับมุม ( $\alpha_1=30^\circ$ ,  $26^\circ$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 5.37

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 โดยวิเคราะห์ที่  $Re=3,000$  พบว่าค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดที่มุม ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ซึ่งให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 11.98 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อวิเคราะห์ที่มุม ( $\alpha_1=26^\circ$ ) พบว่าให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 7.67 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและที่มุม ( $\alpha_1=17^\circ$ ) ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดเท่ากับ 3.99 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 (รูปตัววีด้านหน้า) และการปรับปรุงแบบที่ 3 (รูปตัววีด้านหลัง) พบว่าการตัดองศาที่ด้านทางออกของแหวนทรงกรวย  $\alpha_2=17^\circ$  ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำกว่าการตัดองศาที่ทางเข้าแหวนทรงกรวยเนื่องจากสามมารถตัดองศาน้อยๆได้ ทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลงตามไปด้วย



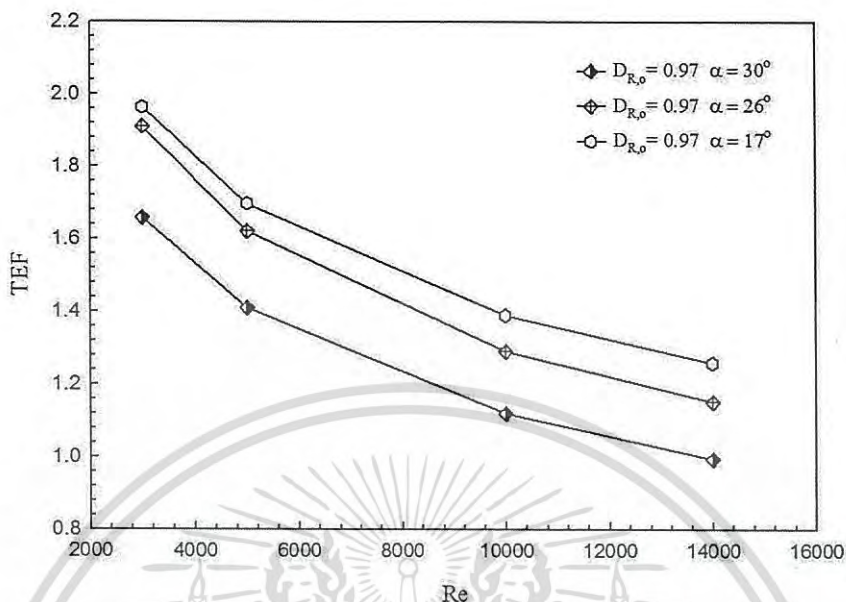
รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 และ 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ ,  $\alpha_1=26^\circ$  และ  $\alpha_1=30^\circ$ )

#### 5.4.4 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ )

ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ในท่อกลมผิวเรียบที่มุม ( $\alpha_2=17^\circ$ ,  $\alpha_1=26^\circ$  และ  $\alpha_1=30^\circ$ ) ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.38

จากรูปที่ 5.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 (รูปตัดวิด้านหลัง) พบว่าที่  $Re=3,000$  ให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดและที่มุม ( $\alpha_2=17^\circ$ ) ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 1.96 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อวิเคราะห์ที่มุม ( $\alpha_1=26^\circ$ ) พบว่าให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.90 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและที่มุม ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนน้อยที่สุดเท่ากับ 1.65 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

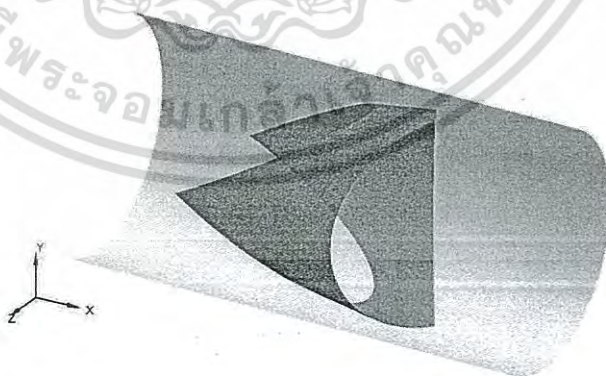
จากการพิจารณาค่าประสิทธิภาพการการถ่ายเทความร้อนพบว่าที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก ( $D_{R,o}$ ) เพิ่มขึ้นจะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้น จากการพิจารณาการตัดศกษาที่ด้านทางออกของแหวนทรงกรวยแบบรูปตัดวิ ( $\alpha_2=17^\circ$ ) สามารถช่วยลดปัญหาอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานได้ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าสูงมากกว่าการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่องศาอื่นๆ



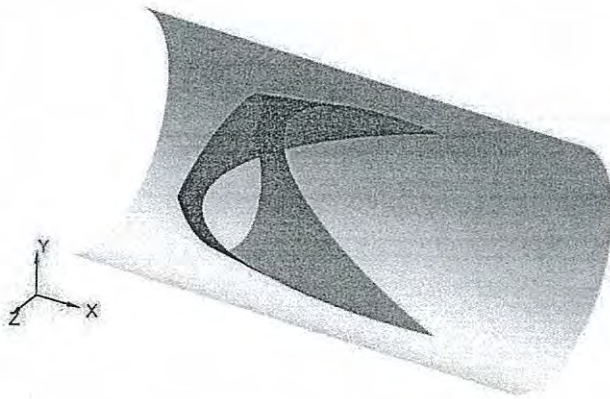
รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 และ 3 ( $\alpha_2=17^\circ$ ,  $\alpha_1=26^\circ$  และ  $\alpha_1=30^\circ$ )

#### 5.5 แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4

จากการศึกษาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงที่ผ่านมาจึงทำให้ทราบว่า การปรับปรุงแหวนทรงกรวย ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูง ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษารูปแบบการปรับปรุงแหวนทรงกรวยโดยตัดรูปตัววีที่ด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวยและตัดรูปตัววีที่ทางออกของแหวนทรงกรวยทำมุมตั้งฉากกับด้านทางเข้า ลักษณะการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 4 แสดงไว้ดังรูปที่ 5.39 และ รูปที่ 5.40



รูปที่ 5.39 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ )



รูปที่ 5.40 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 70^\circ - 20^\circ$ )

5.5.1 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ - 60^\circ$ ,  $70^\circ - 20^\circ$ )

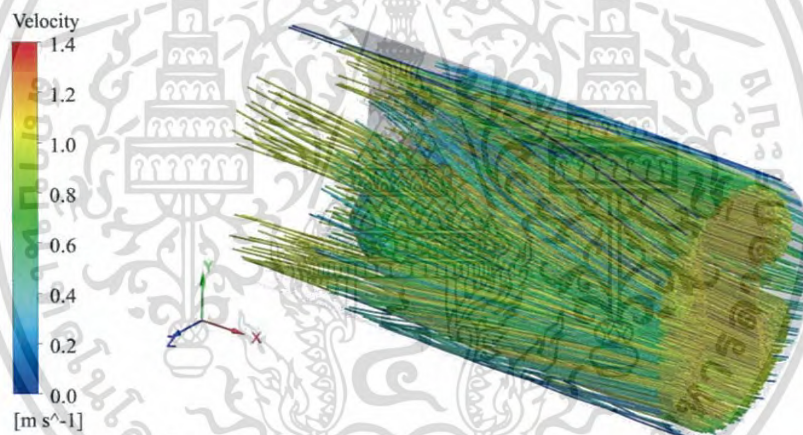
เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 จะแสดงดังรูปที่ 5.41 เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของการไหลของของไหลทดสอบแบบ 3 มิติ

จากรูปที่ 5.41 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ และรูปที่ 5.42 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบทำให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ทำให้ช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลเกิดการไหลหมุนวนมากขึ้น และเมื่อมองภาพที่ 5.53 เมื่อพิจารณาโครงสร้างการไหลซึ่งแสดงผลในรูปของเปลือกห่อหุ้มแกนการไหล core of vortex จะทำให้เห็นได้ชัดเจนขึ้นสำหรับกระแสการไหลแบบหมุนวนภายในท่อกลมเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม พบว่าการใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงโดยตัดรูปตัววีที่ด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวยและตัดรูปตัววีที่ทางออกของแหวนทรงกรวยทำมุมตั้งฉากกับด้านทางเข้าที่มุม ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ - 60^\circ$ ,  $70^\circ - 20^\circ$ ) ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนหรือการไหลหมุนวนมาก



(ก)

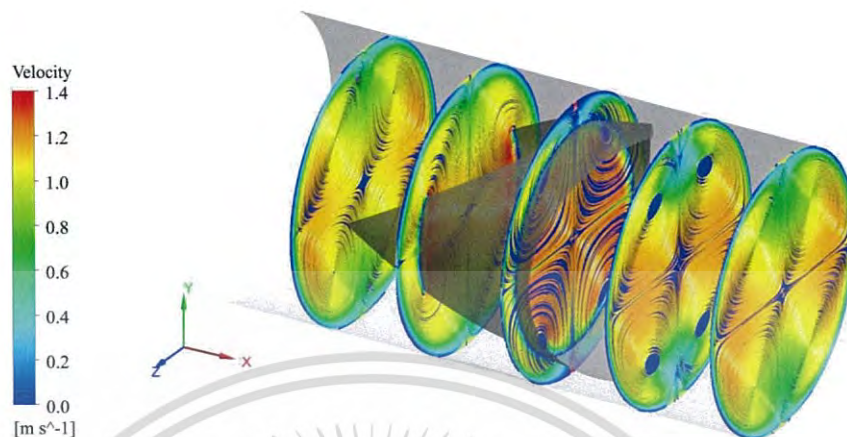


(ข)

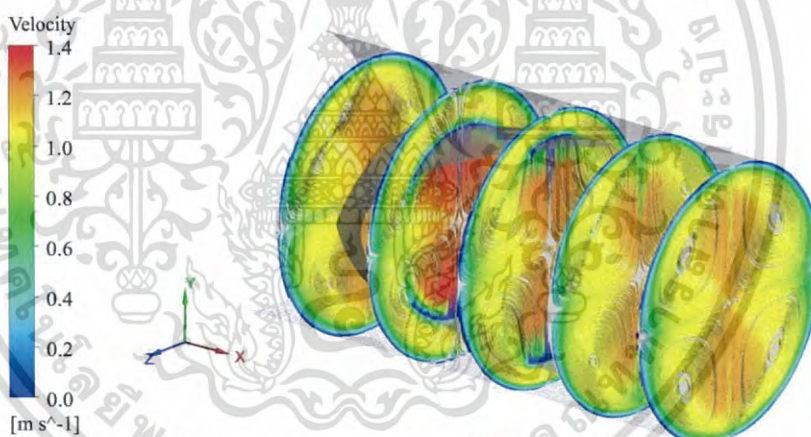
รูปที่ 5.41 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4

(ก) ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ - 60^\circ$ ) และ (ข) ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 70^\circ - 20^\circ$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



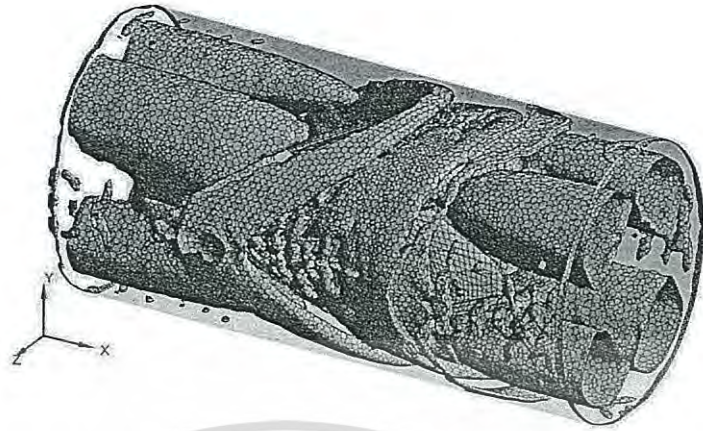
(ก)



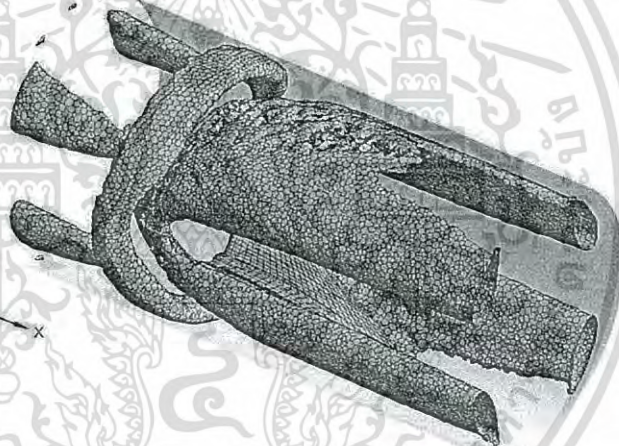
(ข)

รูปที่ 5.42 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4  
 (ก)  $(\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ)$  และ (ข)  $(\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



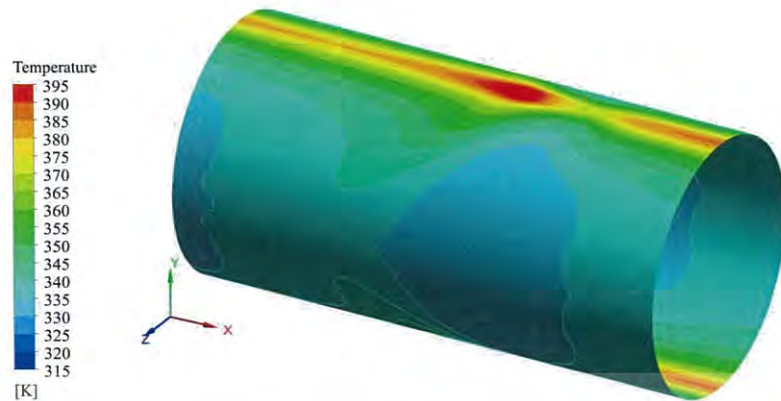
(ข)

รูปที่ 5.43 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ซึ่งแสดงในรูปของ core of vortex (ก) ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) และ (ข) ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ )

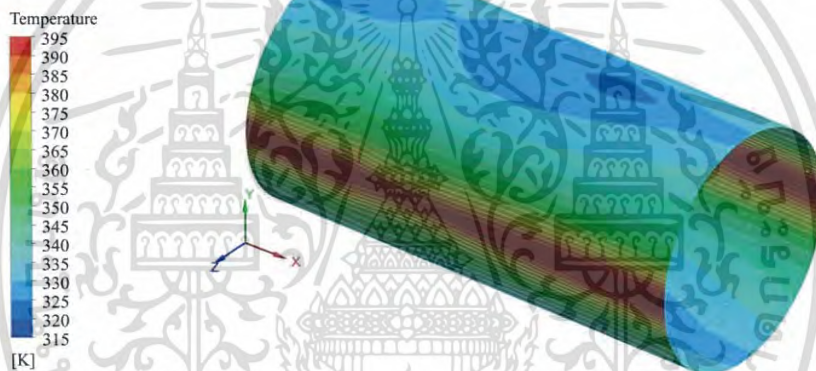
#### 5.5.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ , $70^\circ-20^\circ$ )

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 หรือการตัดรูปตัววีที่ด้านทางเข้าของแหวนทรงกรวยและตัดรูปตัววีที่ทางออกของแหวนทรงกรวยทำมุมตั้งฉากกับด้านทางเข้าที่ใส่ภายในท่อกลมเมื่อพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.44 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4  
(ก)  $(\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ)$  และ (ข)  $(\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ)$

จากรูปที่ 5.44 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนทรงกรวย  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ที่มุม  $(\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ)$  ช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้นหรือมีการกระจายอุณหภูมิมากกว่าที่มุม  $(\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ)$  สังเกตได้จากคอนทัวร์สีเขียวและสีฟ้าที่เกิดขึ้นและเห็นได้จากคอนทัวร์แดงที่น้อยกว่าแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เกิดคอนทัวร์สีแดงยังมีอุณหภูมิสูงหรือเกิดการปั่นป่วนของกระแสการไหลน้อยจึงมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ

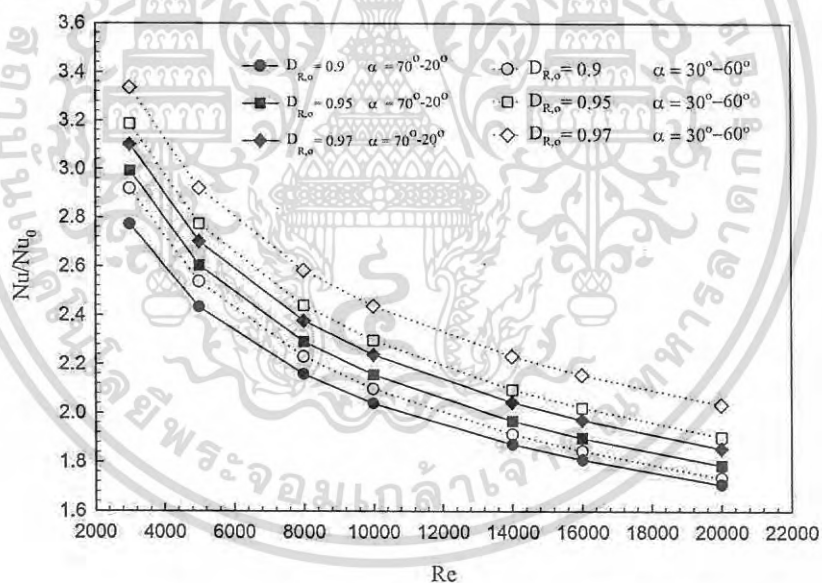
เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิจะเห็นได้ว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มการกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับผนังท่อมากขึ้น โดยสังเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคอนทอร์สซีเขียวและสีฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผนังท่อ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงแบบที่ 4 ทรงข้าวหลามตัดมีการกระจายอุณหภูมิมากกว่า

รูปที่ 5.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 เมื่อใส่ภายในท่อกลม เมื่อพิจารณาที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ),  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 3.33 และ 2.03 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 3.18 และ 1.90 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 2.91 และ 1.73 ตามลำดับ

จากการพิจารณาที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ) ที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 3.10 และ 1.85 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 2.99 และ 1.78 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ 2.77 และ 1.70 ตามลำดับ



รูปที่ 5.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ,  $70^\circ-20^\circ$ )

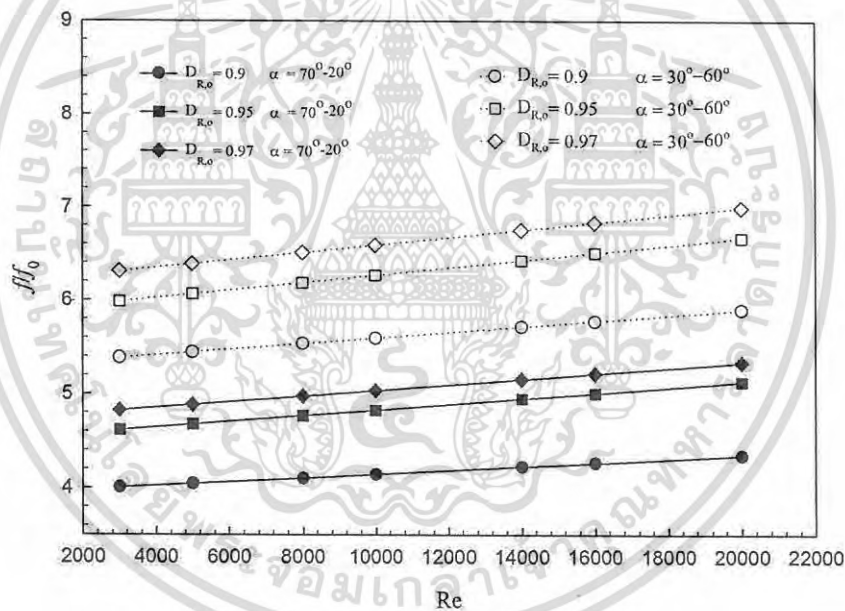
### 5.5.3 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ , $70^\circ-20^\circ$ )

ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 แสดงได้ดังรูปที่ 5.46 เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์เมื่อใส่

แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 (รูปตัววีที่ทางเข้าและทางออกตั้งฉากกับทางเข้า) พบว่าค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) ให้ค่าสูงกว่าที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ )

เมื่อพิจารณาที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ),  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 4.82 และ 5.33 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 4.61 และ 5.12 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 4.00 และ 4.34 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ )  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 6.31 และ 6.99 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 5.98 และ 6.66 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 5.38 และ 5.89 ตามลำดับ



รูปที่ 5.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ,  $70^\circ-20^\circ$ )

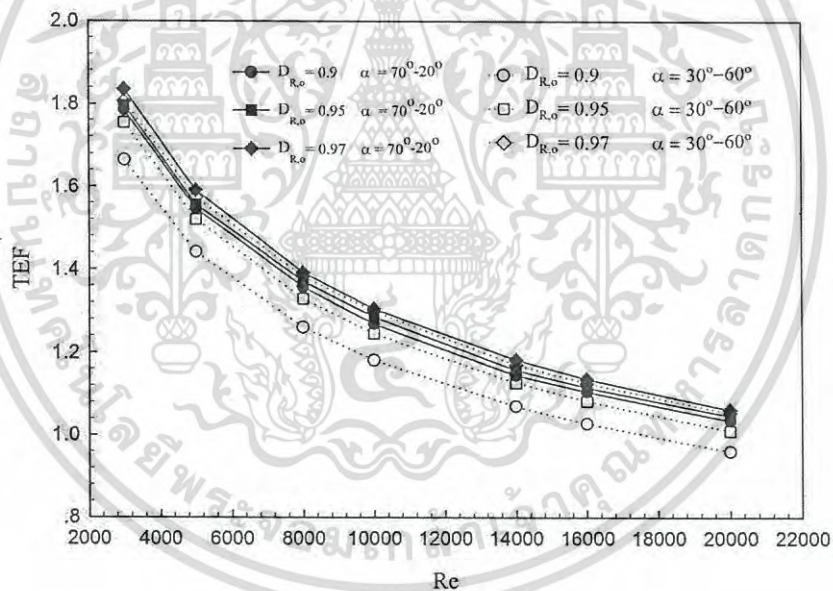
#### 5.5.4 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ , $70^\circ-20^\circ$ )

ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับค่ากับเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ในท่อกลมผิวเรียบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.47

จากรูปที่ 5.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 พบว่าที่มุม  $(\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ)$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่าที่มุม  $(\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ)$

เมื่อพิจารณาที่มุม  $(\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ)$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.83 และ 1.06 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.79 และ 1.04 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.87 และ 1.03 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่มุม  $(\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ)$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.80 และ 1.05 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.75 และ 1.01 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.66 และ 0.96 ตามลำดับ

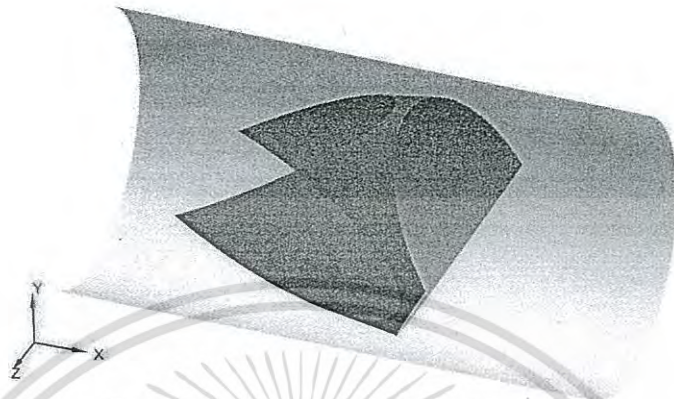


รูปที่ 5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ,  $70^\circ-20^\circ$ )

## 5.6 แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5

แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (รูปทรงข้าวหลามตัด) ซึ่งจัดวางแหวนทรงกรวยแบบลู่อูเข้าหรือหันแหวนทรงกรวยเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กชี้ทวนกระแสการไหลของของไหล โดยกำหนดระยะพิตซ์  $P_R$ , อัตราส่วนการขวางการไหล  $D_{R,i}=0.6$ , ขนาดกรวยที่ทางออก  $D_{R,o}=0.9, 0.95, 0.97$ ,

ความยาวแหวนทรงกรวย  $L=50$  mm และองศาในการตัด ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ,  $70^\circ-20^\circ$ ) การใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ภายในท่อกลมดังรูปที่ 5.48 และ รูปที่ 5.49



รูปที่ 5.48 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ )



รูปที่ 5.49 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ )

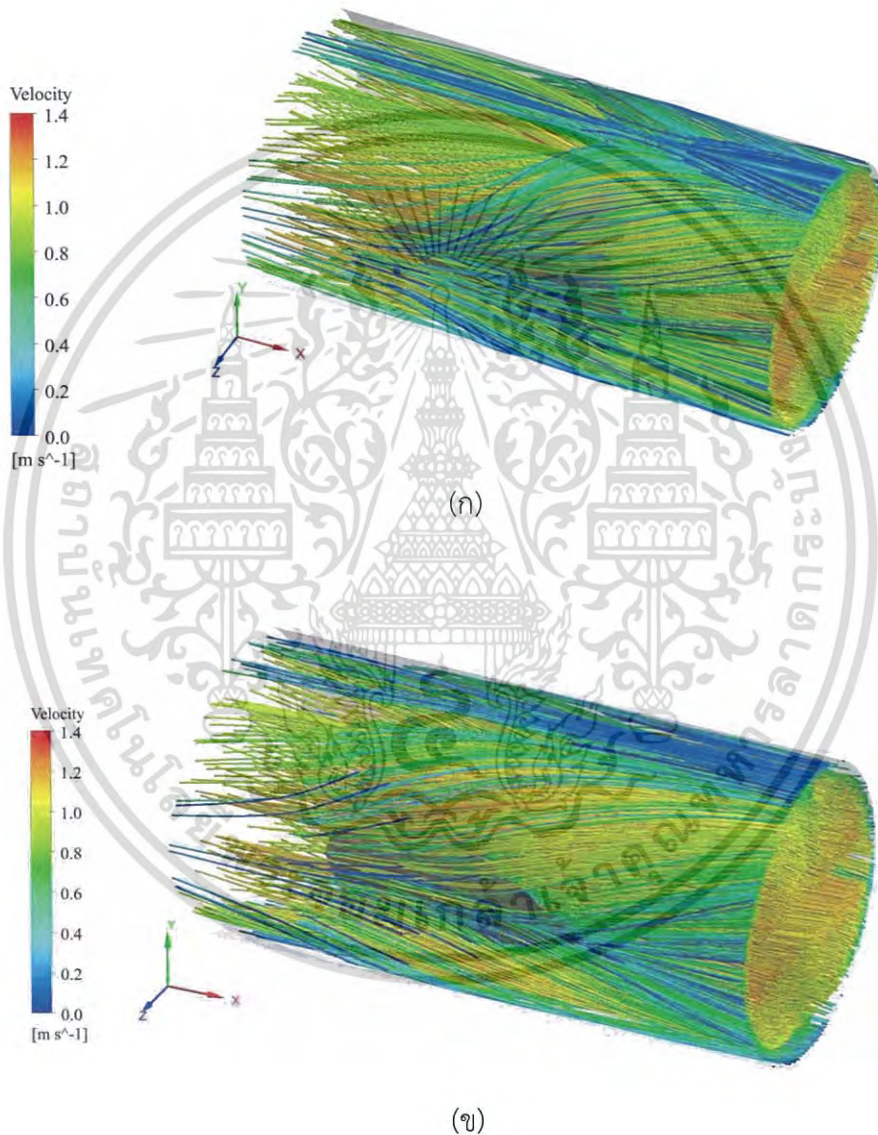
#### 5.6.1 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ , $70^\circ-20^\circ$ )

เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 จะแสดงดังรูปที่ 5.50 เพื่อให้เห็นพฤติกรรมการไหลของของไหลทดสอบแบบ 3 มิติ

จากรูปที่ 5.50 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติ และรูปที่ 5.51 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบและเมื่อมองภาพที่ 5.52 เมื่อพิจารณาโครงสร้างการไหลซึ่งแสดงผลในรูปของเปลือกห่อหุ้ม

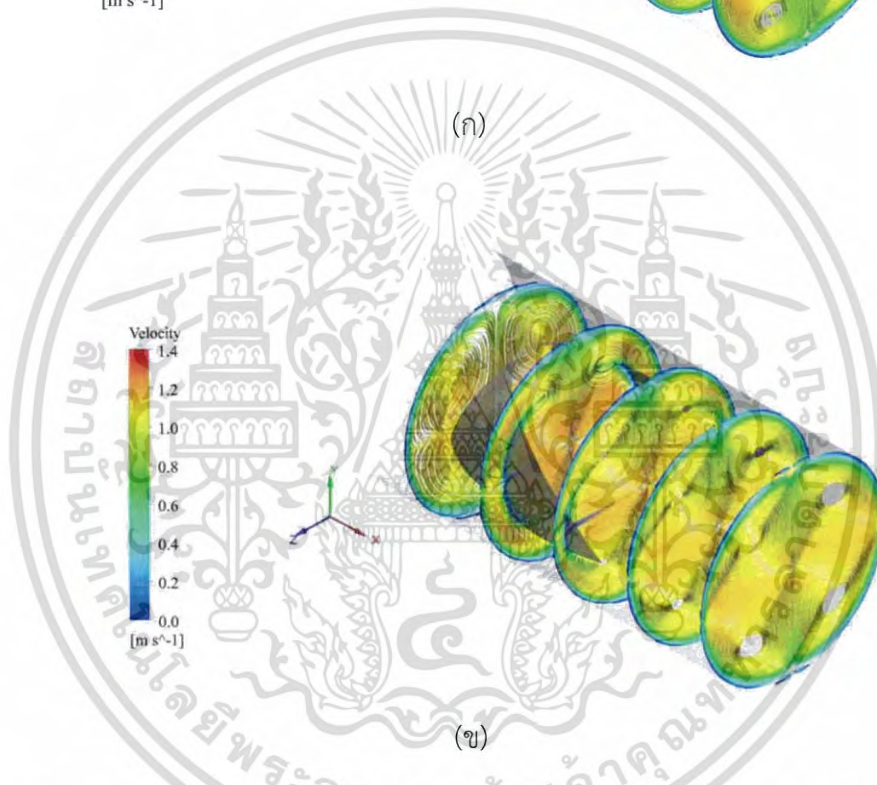
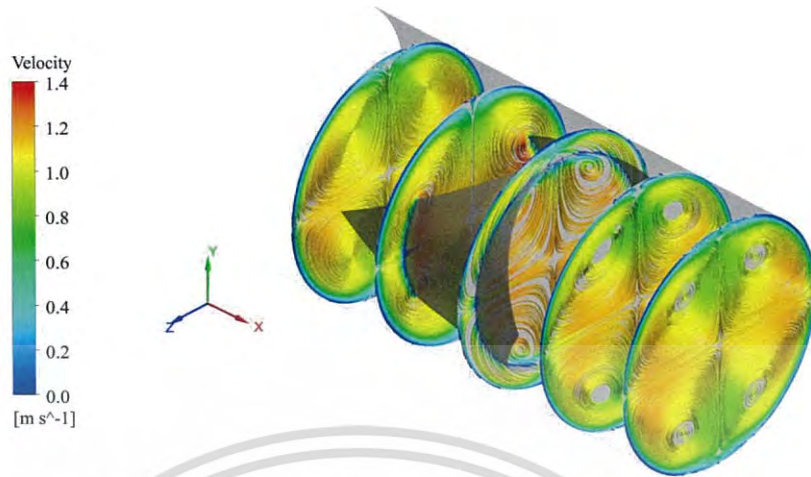
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนการไหล core of vortex จะทำให้เห็นได้ชัดเจนขึ้นสำหรับกระแสการไหลแบบหมุนวนภายในท่อกลมเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 โดยตัดองศาที่ด้านทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวย ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ,  $70^\circ-20^\circ$ ) โดยบริเวณที่เกิดการไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดเปลือกห่อหุ้มหนา และเมื่อพิจารณาที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) และมุม ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ) พบว่าพฤติกรรมการไหลไม่แตกต่างกันมากนัก โดยบริเวณที่เกิดการไหลแบบปั่นป่วนหรือเกิดการไหลหมุนวนส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณด้านหน้าของแหวนทรงกรวยที่ทำการปรับปรุงองศาสังเกตได้จากเปลือกห่อหุ้มที่เกิดขึ้น



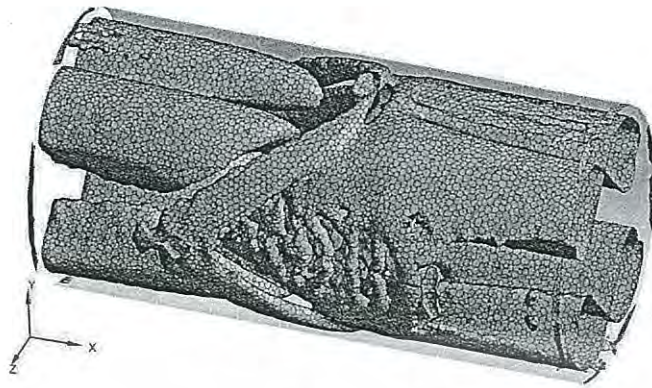
รูปที่ 5.50 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5  
(ก) ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) และ (ข) ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.51 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5  
 (ก)  $(\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ)$  และ (ข)  $(\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

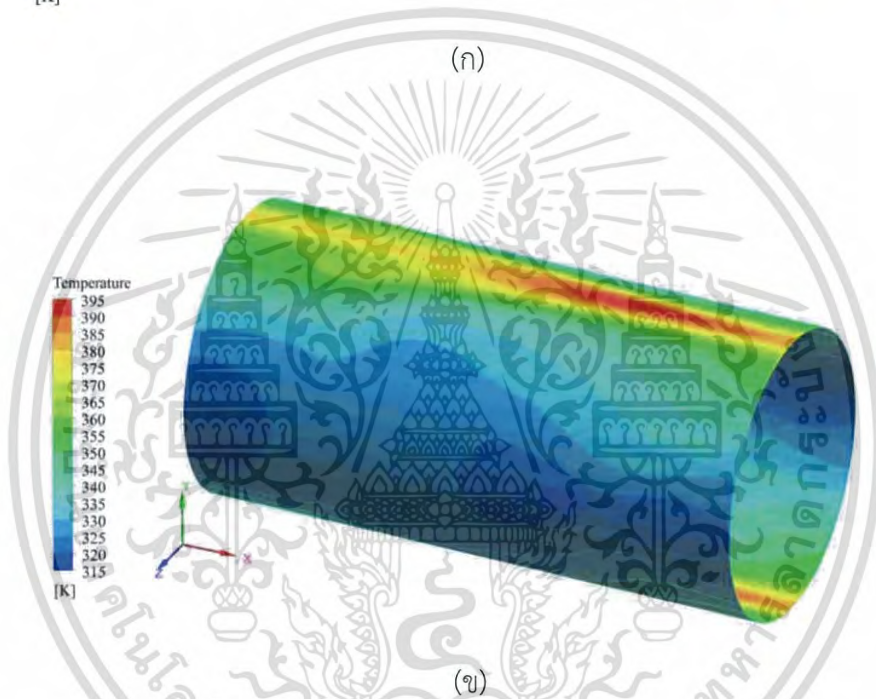
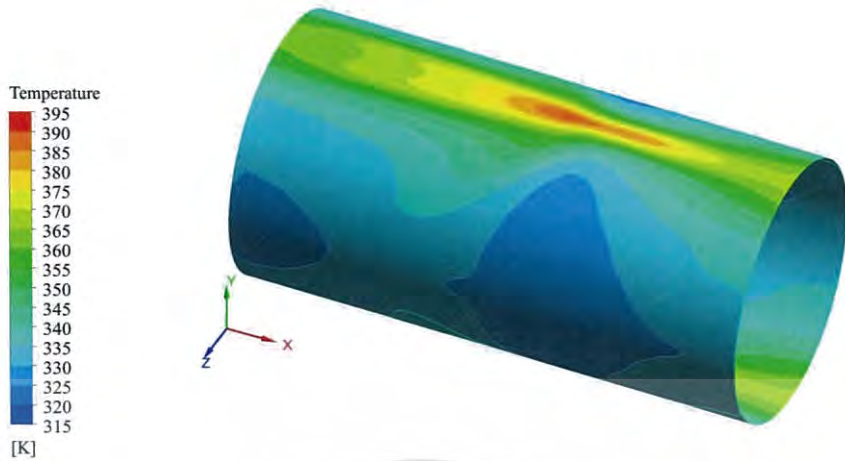


(ข)

รูปที่ 5.52 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ซึ่งแสดงในรูปของ core of vortex (ก) ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ - 60^\circ$ ) และ (ข) ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 70^\circ - 20^\circ$ )

5.6.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ - 60^\circ$ ,  $70^\circ - 20^\circ$ )

การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ภายในท่อกลมเมื่อพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.53



รูปที่ 5.53 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5  
(ก)  $(\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ)$  และ (ข)  $(\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ)$

จากรูปที่ 5.53 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อพิจารณาคอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิที่  $(\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ)$  แสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ภายในท่อกลมช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้นสังเกตได้จากคอนทัวร์สีเขียวและสีฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกับความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูงและบริเวณที่เกิดความปั่นป่วนหรือการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิที่บริเวณผนังท่อน้อยที่สุดคือบริเวณที่ปลายตัดของแหวนทรงกรวยซึ่งเห็นได้จากคอนทัวร์สีแดง และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5  $(\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าคอนทอร์สที่สร้างขึ้นมีมากกว่ามุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) นั้นแสดงถึงการแลกเปลี่ยนของอุณหภูมิที่บริเวณผนังท่อน้อยกว่าหรือเกิดความปั่นป่วนของของไหลน้อยกว่า

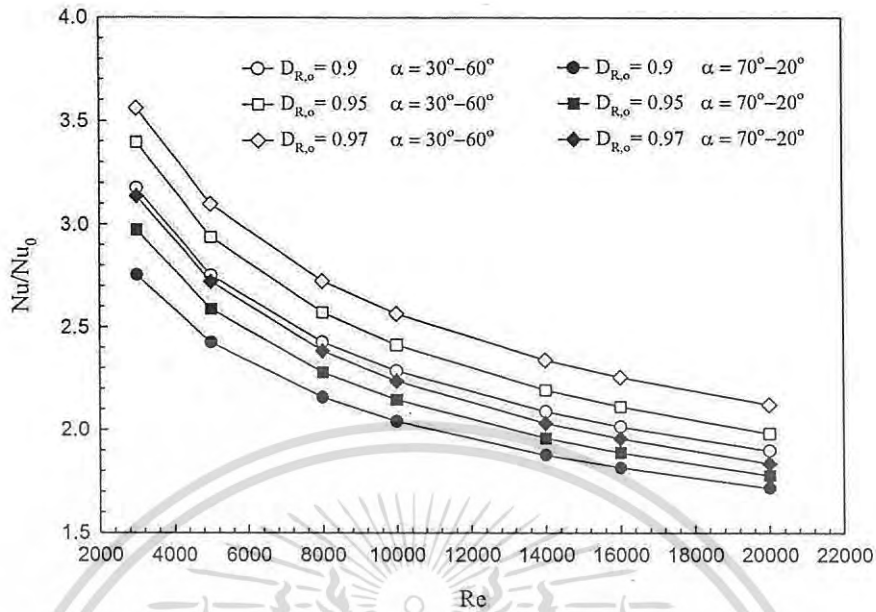
เมื่อพิจารณาคอนทอร์สของการกระจายอุณหภูมิจะเห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด) ภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มการกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อนที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับผนังท่อนมากขึ้น โดยสังเกตจากคอนทอร์สที่เรียบและสีฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผนังท่อนโดยที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) เกิดการกระจายอุณหภูมิมากกว่าที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ )

รูปที่ 5.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 (ทรงข้าวหลามตัด) เมื่อใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่การตัดมุม  $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ,  $70^\circ-20^\circ$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $0.95$  และ  $0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ถึง  $20,000$  โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบสี่ทวนกระแสการไหล เมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก ( $D_{R,o}$ ) ทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์เพิ่มมากขึ้นและเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์ลดลง และที่มุม  $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์สูงกว่าที่มุม  $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$

เมื่อวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์สูงสุดอยู่ที่ 3.56 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่มุม  $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=20,000$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์ลดลงอยู่ที่ 2.12 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์เท่ากับ 3.39 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์เท่ากับ 1.98 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์เท่ากับ 3.15 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและที่  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์เท่ากับ 1.89 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

เมื่อวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์ที่มุม  $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์สูงสุดอยู่ที่ 3.14 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่มุม  $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=20,000$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์ลดลงอยู่ที่ 1.95 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์เท่ากับ 2.97 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์เท่ากับ 1.77 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์เท่ากับ 2.75 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและที่  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์เท่ากับ 1.71 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

จากการพิจารณาข้างต้นพบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์สูงสุดอยู่ที่  $Re=3,000$  ที่มุม  $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$  และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก  $D_{R,o}=0.9$ ,  $0.95$  และ  $0.97$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์เท่ากับ 3.15, 3.39 และ 3.56 ตามลำดับ การใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเชิลท์สูงกว่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

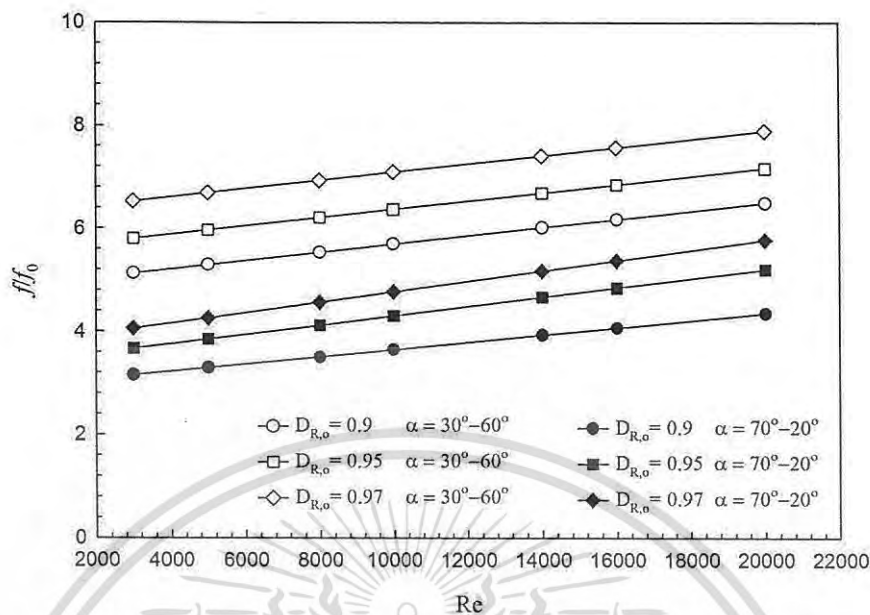


รูปที่ 5.54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลล์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ )

### 5.6.3 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ )

ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ทรงข้าวหลามตัดที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ) ดังแสดงในรูปที่ 5.55 จากกราฟพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับการปรับปรุงที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) และ มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ) พบว่าที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากกว่ามุม ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ) โดยค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ),  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าตัวอัตราส่วนประกอบเสียดทานเท่ากับ 6.52 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 7.88 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อพิจารณาที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ),  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.9$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดเท่ากับ 5.13 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=20,000$  ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 6.49

จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าการปรับปรุงแหวนทรงกรวย 5 ที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ) แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงแหวนทรงกรวย 4 ที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) ยังให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์สูงด้วยเช่นกัน



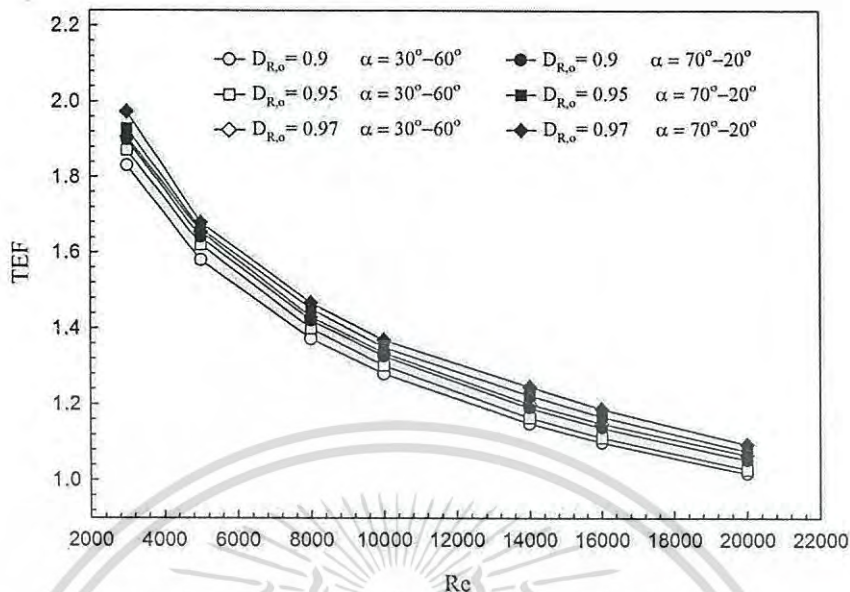
รูปที่ 5.55 ความสัมพันธ์ระหว่างคิอิตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ )

#### 5.6.4 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ )

ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับค่าเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ, 70^\circ-20^\circ$ ) ในท่อกลมผิวเรียบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.56

โดยค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ) ให้ค่าสูงสุดที่ 1.97 เมื่อพิจารณาที่  $Re=3,000, D_{R,i}=0.6, D_{R,o}=0.97, P_R=2.0$  และที่  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.09 เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6, D_{R,o}=0.95, P_R=2.0, Re=3,000$  และที่  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.92 และ 1.07 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6, D_{R,o}=0.9, P_R=2.0, Re=3,000$  และที่  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.89 และ 1.05 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ 1.90 เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6, D_{R,o}=0.97, P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  และเมื่อพิจารณาที่  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.06 เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6, D_{R,o}=0.95, P_R=2.0, Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.87 และ 1.02 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.6, D_{R,o}=0.9, P_R=2.0, Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.83 และ 1.01 ตามลำดับ



รูปที่ 5.56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ - 60^\circ, 70^\circ - 20^\circ$ )

จากรูปที่ 5.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 พบว่าที่มุม ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 70^\circ - 20^\circ$ ) ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าการปรับปรุงที่มุม ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ - 60^\circ$ ) แต่จากการพิจารณาค่าอัตราส่วนเลขนี้สเชิลท์พบว่าที่มุม ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ - 60^\circ$ ) ให้ค่าสูงกว่าที่มุม ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 70^\circ - 20^\circ$ ) ซึ่งหมายถึงว่าที่มุม ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ - 60^\circ$ ) ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่มุม ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 70^\circ - 20^\circ$ ) แต่เนื่องจากค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่สูงขึ้นจึงเป็นผลทำให้ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่มุม ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ - 60^\circ$ ) มีค่าต่ำกว่าการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่มุม ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 70^\circ - 20^\circ$ ) แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่มีความน่าสนใจสำหรับการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่มุม ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ - 60^\circ$ ) เนื่องจากสามารถเพิ่มขนาดของแหวนทรงกรวยเพื่อช่วยลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานได้ และยังคงองศาในการปรับปรุงไว้ให้ใกล้เคียงกับการปรับปรุงองศาและรูปทรงของแหวนทรงกรวยที่ผ่านมาเพื่อเปรียบเทียบผลได้

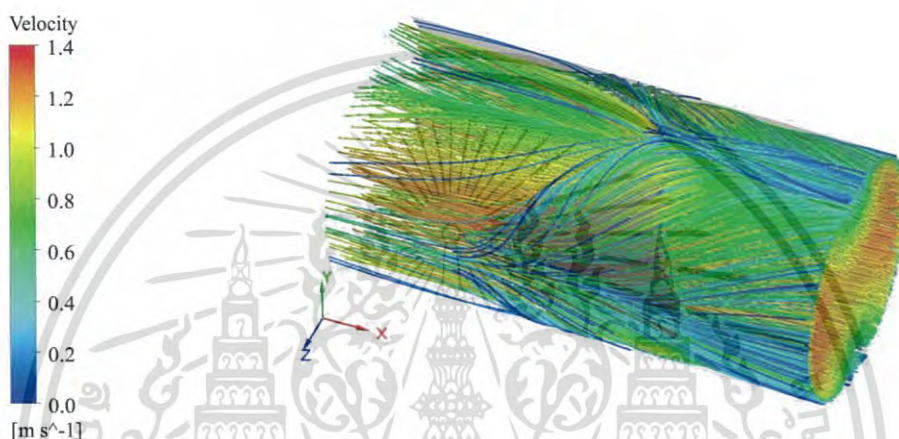
จากการพิจารณาค่าประสิทธิภาพการการถ่ายเทความร้อนพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแหวนทรงกรวย ( $D_{R,o}$ ) จะให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้น จากการพิจารณาองศาการตัดพบว่าที่มุม ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 70^\circ - 20^\circ$ ) ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่ามุม ( $\alpha_1 - \alpha_2 = 30^\circ - 60^\circ$ ) เนื่องจากสามารถช่วยลดปัญหาอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานได้ดังแสดงค่าในรูปที่ 5.55 เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและเมื่อเปรียบเทียบกับแบบปรับปรุงแหวนทรงกรวย 5 พบว่าให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่า

จากการศึกษาผลที่ได้จากการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบต่างๆทั้ง 5 แบบจึงเป็นผลให้สรุปได้ว่าการปรับปรุงแหวนทรงกรวย 5 ทรงข้าวหลามตัด ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนดีที่สุด ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาต่อไปโดยเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวย

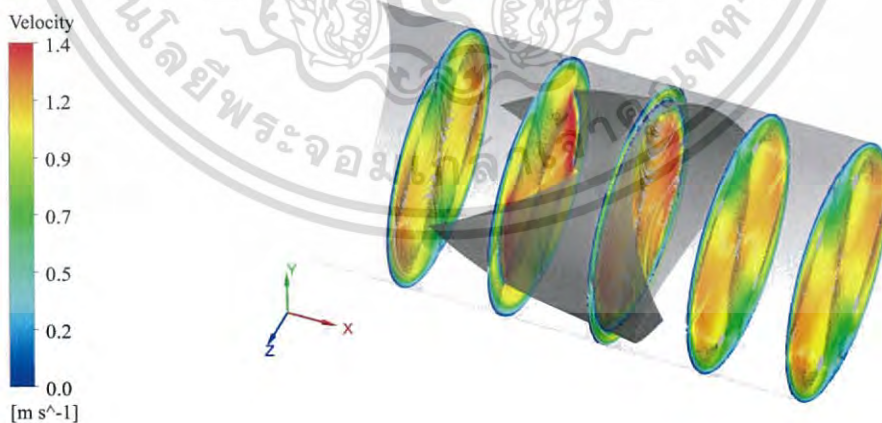
และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระยะพิตซ์ เพื่อเปรียบเทียบผลและสรุปผลที่ดีที่สุดที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ โดยทำการศึกษาที่มุม  $(\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ)$  ที่  $D_{R,i}=0.7$  และ  $0.8$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $0.98$  และ  $0.99$  ที่  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$

### 5.6.5 เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2 = 33.5^\circ-60^\circ$ )

เส้นกระแสการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2= 33.5^\circ-60^\circ$ ) จะแสดงดังรูปที่ 5.57 เพื่อให้เห็นพฤติกรรมการไหลของของไหลทดสอบแบบ 3 มิติ

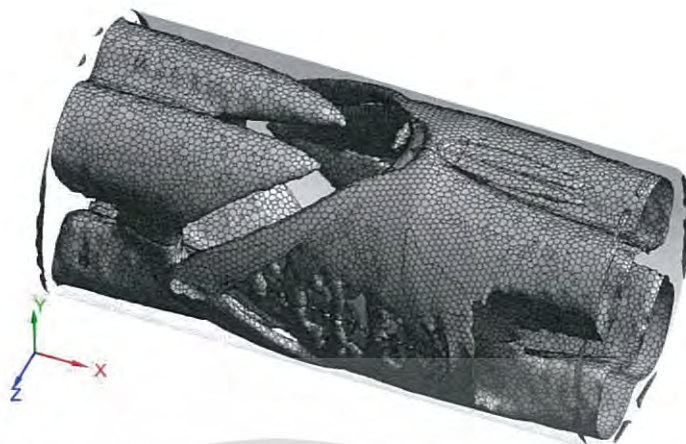


รูปที่ 5.57 เส้นกระแสการไหลแบบ 3 มิติเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ )



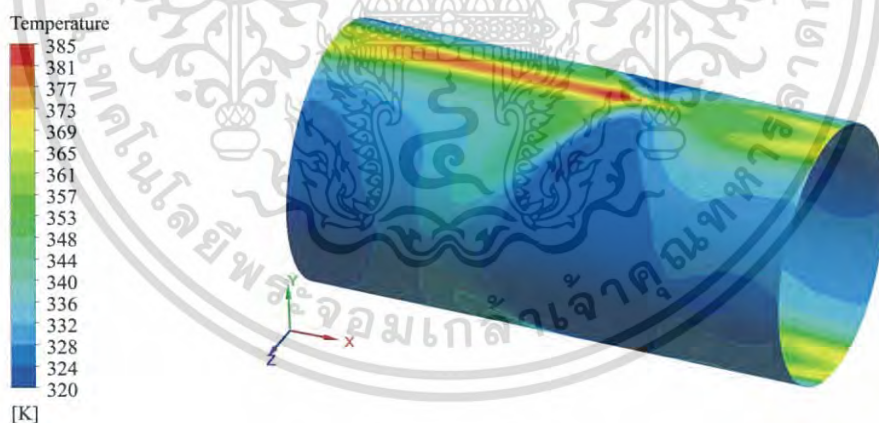
รูปที่ 5.58 เส้นกระแสการไหลในแนวระนาบเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.59 โครงสร้างการไหลเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ซึ่งแสดงในรูปของ core of vortex ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ )

5.6.6 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2 = 33.5^\circ-60^\circ$ )  
 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ )  
 ภายในท่อกลมเมื่อพิจารณาในรูปของการกระจายอุณหภูมิ จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.60



รูปที่ 5.60 คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ )

จากรูปที่ 5.60 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีการใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ที่  $D_{R,i}=0.7$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อพิจารณา คอนทัวร์ของการกระจายอุณหภูมิที่ ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) แสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ภายในท่อกลมช่วยให้การกระจายของอุณหภูมิมากขึ้นสังเกตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคอนทอร์สซีเวียและสีฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิต่ำกับความร้อนที่บริเวณผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูงและบริเวณที่เกิดความปั่นป่วนหรือการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิที่บริเวณผนังท่อน้อยที่สุดคือบริเวณที่ปลายตัดของแหวนทรงกรวยซึ่งเห็นได้จากคอนทอร์สซีแดง และเมื่อเปรียบเทียบกับกรวยใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) จะเห็นว่าคอนทอร์สซีแดงที่เกิดขึ้นมีน้อยกว่าที่  $D_{R,i}=0.6$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  นั้นแสดงถึงการแลกเปลี่ยนของอุณหภูมิที่บริเวณผนังท่อน้อยกว่าหรือเกิดความปั่นป่วนของของไหลมากกว่า

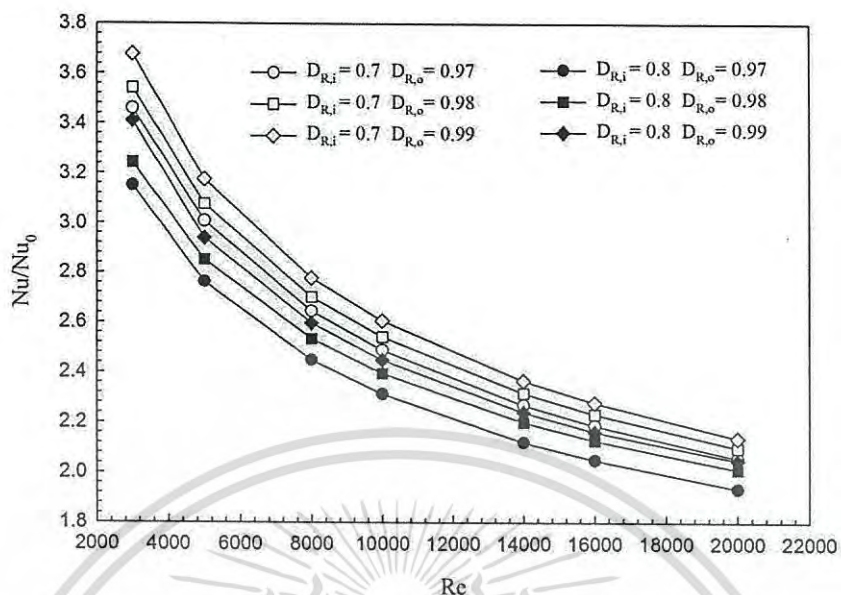
เมื่อพิจารณาคอนทอร์สซีของการกระจายอุณหภูมิจะเห็นได้ว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ทรงข้าวหลามตัด ภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มการกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้กับผนังท่อที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับผนังท่อนมากขึ้น โดยสังเกตจากคอนทอร์สซีเขียวและสีฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผนังท่อ

รูปที่ 5.61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่มุม (ทรงข้าวหลามตัด) เมื่อใส่ภายในท่อกลม ซึ่งพิจารณาที่การตัดมุม  $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ,  $D_{R,i}=0.7$  และ  $0.8$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $0.98$  และ  $0.99$ ,  $P_R=1.5$ ,  $2.0$ ,  $2.5$  และ  $Re=3,000$  ถึง  $20,000$  โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบซี่ทวนกระแสดังกล่าว เมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออก ( $D_{R,o}$ ) ทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า ( $D_{R,i}$ ) ทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์น้อยลงและเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง

เมื่อวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ที่  $3.67$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่  $D_{R,i}=0.7$ ,  $D_{R,o}=0.99$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  เมื่อวิเคราะห์ที่  $Re=20,000$ ,  $D_{R,i}=0.7$ ,  $D_{R,o}=0.99$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลง อยู่ที่  $2.13$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.7$ ,  $D_{R,o}=0.98$ ,  $P_R=2$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ  $3.54$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ  $2.09$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.7$ ,  $D_{R,o}=0.99$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ  $3.46$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและที่  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ  $2.05$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

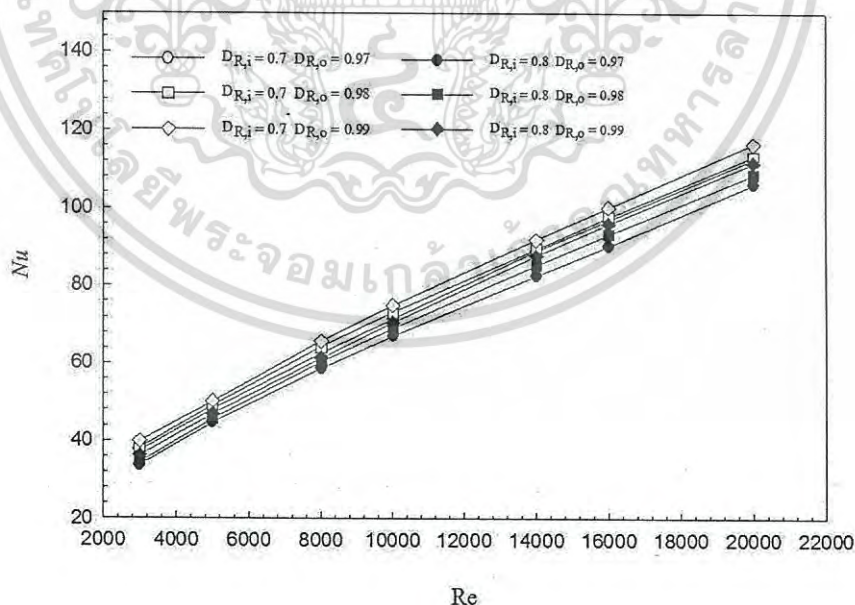
เมื่อวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ที่  $D_{R,i}=0.8$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดเท่ากับ  $3.41$  ที่  $Re=3,000$ ,  $D_{R,i}=0.8$ ,  $D_{R,o}=0.99$  และ  $P_R=2.0$  พบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดลงอยู่ที่  $2.04$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.8$ ,  $D_{R,o}=0.98$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ  $3.24$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ  $2.01$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.8$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ  $3.15$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและที่  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เท่ากับ  $1.93$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

จากการพิจารณาข้างต้นพบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงสุดอยู่ที่  $Re=3,000$  ที่  $D_{R,i}=0.7$ ,  $D_{R,o}=0.99$  การใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่มุม  $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงกว่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบและการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม



รูปที่ 5.61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ )

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ในรูปแบบของค่าเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ จะเห็นได้ว่าค่าเลขนัสเซิลท์จะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ดังแสดงให้เห็นได้รูปที่ 5.62



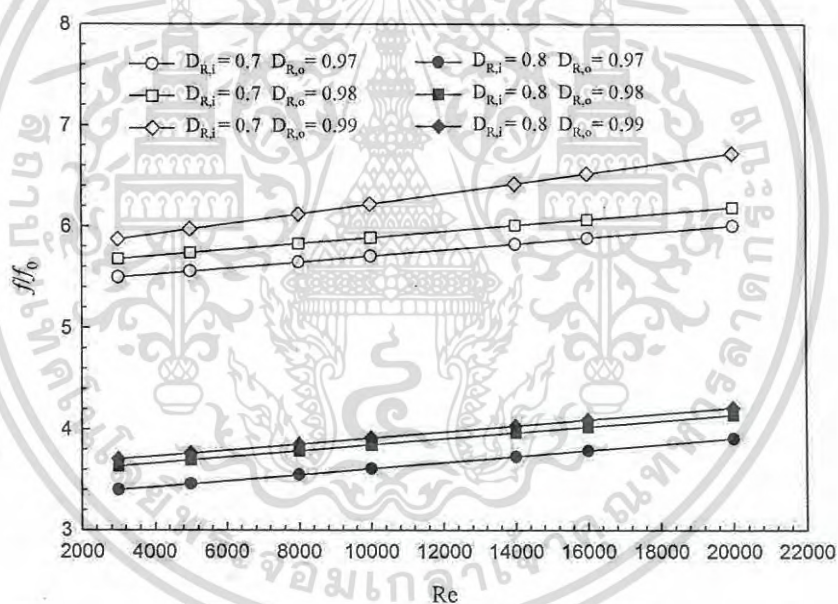
รูปที่ 5.62 ค่าเลขนัสเซิลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.6.7 ตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ )

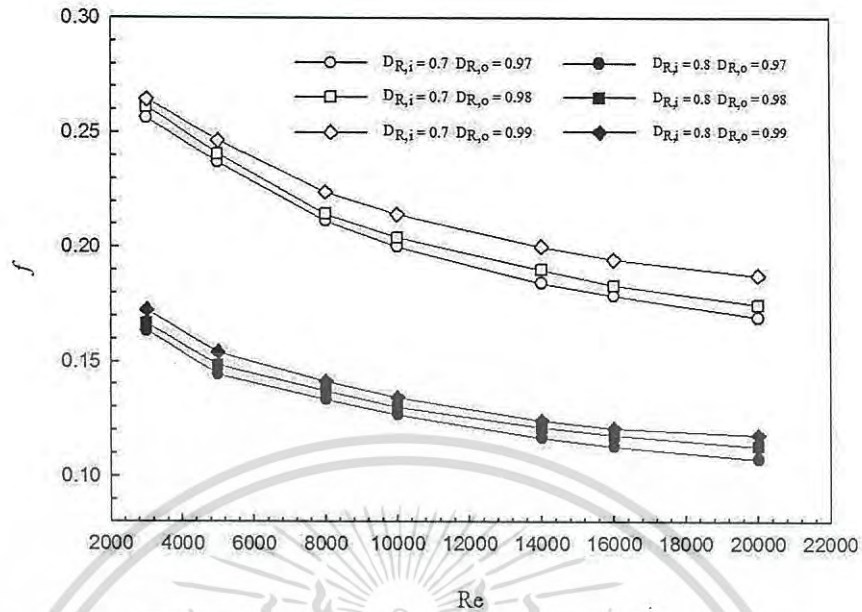
ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่มีมุม ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ดังแสดงในรูปที่ 5.63 จากกราฟพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับการเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า  $D_{R,i}=0.7$  และ  $0.8$  พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าทำให้ช่วยลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลงได้ โดยค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำที่สุดที่  $D_{R,i}=0.8$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ค่าตัวอัตราส่วนประกอบเสียดทานเท่ากับ 3.39 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=20,000$  ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 3.90 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.7$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดเท่ากับ 5.49 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ และที่  $Re=20,000$  ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเท่ากับ 6.00

จากการศึกษาการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 5 ที่มีมุม ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงเมื่อ  $D_{R,i}=0.7$  แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า  $D_{R,i}=0.8$  จะช่วยให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลงจึงเป็นผลทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 5.63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ )

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ในรูปแบบของค่าตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบเสียดทานจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงให้เห็นได้รูปที่ 5.64

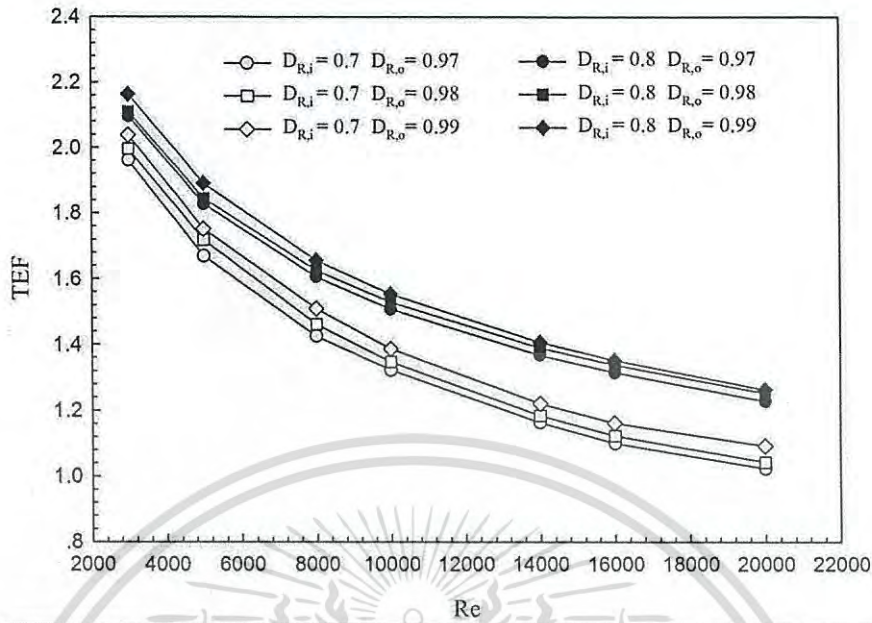


รูปที่ 5.64 ค่าตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ )

5.6.8 สมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับค่าเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ในท่อกลมผิวเรียบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.65

โดยค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ให้ค่าสูงสุดที่ 2.20 เมื่อพิจารณาที่  $Re=3,000$ ,  $D_{R,i}=0.8$ ,  $D_{R,o}=0.99$ ,  $P_R=2$  และที่  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.28 เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.8$ ,  $D_{R,o}=0.98$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และที่  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 2.10 และ 1.25 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.8$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และที่  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 2.09 และ 1.22 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่  $D_{R,i}=0.7$ ,  $D_{R,o}=0.97$ ,  $P_R=2.0$  และ  $Re=3,000$  และเมื่อพิจารณาที่  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.96 และ 1.13 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.7$ ,  $D_{R,o}=0.95$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.98 และ 1.14 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่  $D_{R,i}=0.7$ ,  $D_{R,o}=0.99$ ,  $P_R=2.0$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 2.03 และ 1.15 ตามลำดับ



รูปที่ 5.65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ )

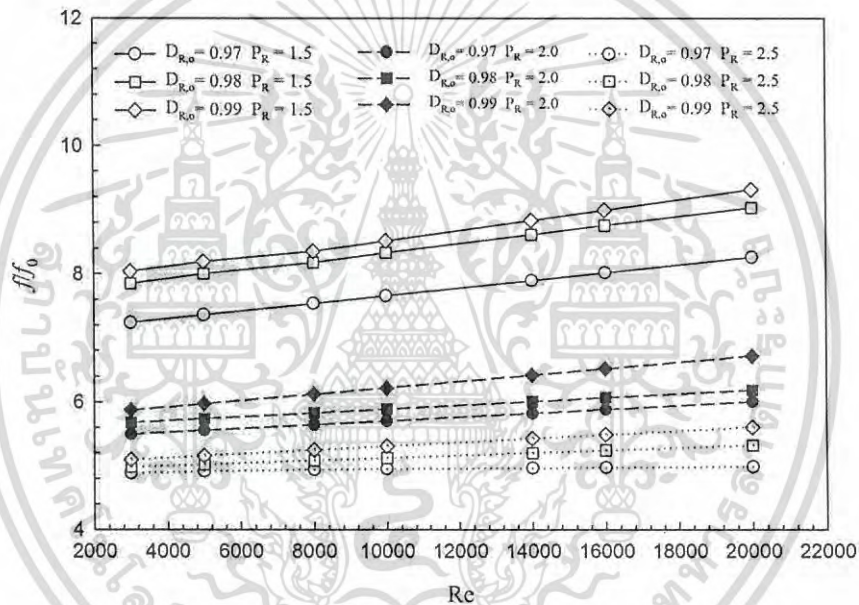
จากรูปที่ 5.65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 พบว่าที่มุม ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ),  $D_{R,i}=0.8$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่า  $D_{R,i}=0.7$  แต่จากการพิจารณาค่าอัตราส่วนเลขเรย์โนลด์ที่พบว่าที่  $D_{R,i}=0.7$  ให้ค่าสูงกว่าที่  $D_{R,i}=0.8$  ซึ่งหมายถึงว่าที่  $D_{R,i}=0.7$  ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า แต่เนื่องจากค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานที่สูงขึ้นจึงเป็นผลทำให้ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่  $D_{R,i}=0.7$  มีค่าต่ำกว่าการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่  $D_{R,i}=0.8$  ดังนั้นโดยภาพรวมของการศึกษาเมื่อวิเคราะห์ค่าที่  $D_{R,i}=0.8$  จึงเห็นได้ว่ามีความน่าสนใจมากกว่า  $D_{R,i}=0.7$  เนื่องจากให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงมากกว่าและเมื่อเพิ่ม  $Re$  ให้สูงขึ้น การลดลงของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนก็ยังอยู่ในช่วงที่น่าพอใจในระดับนี้ เนื่องจาก  $D_{R,i}=0.8$  ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดต่ำลงมากเมื่อเทียบกับ  $D_{R,i}=0.7$

### 5.7 อิทธิพลของอัตราส่วนระยะพิทช์

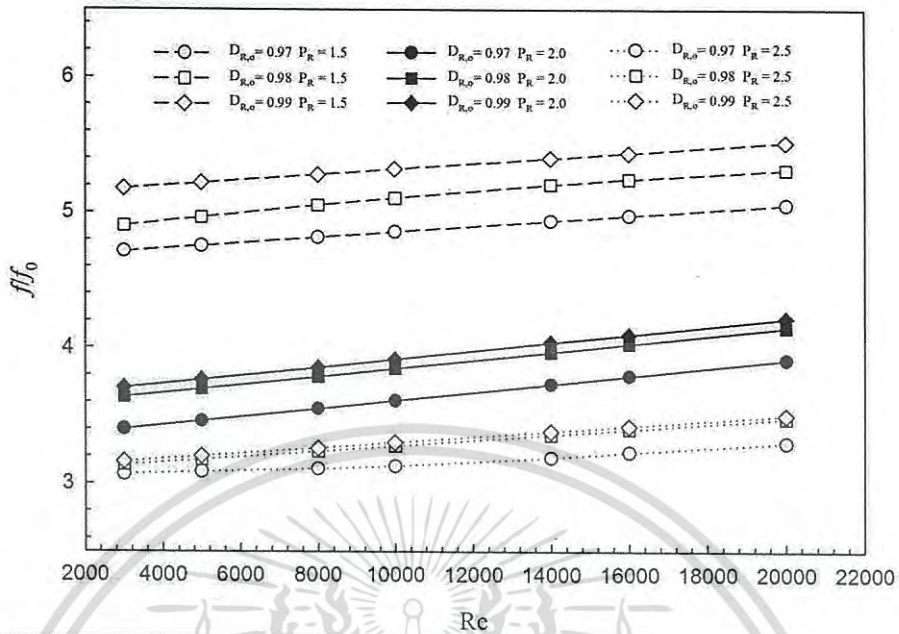
จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการปรับปรุงแหวนทรงกรวยโดยการตัดองศาให้มีขนาดเล็กลงมีผลกับค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์รูปทรงของแหวนทรงกรวยที่ทำการปรับปรุงพบว่ารูปทรงแหวนทรงกรวยแบบทรงข้าวหลามตัดให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรวยในแบบอื่นๆ และการเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวยสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนได้อีกด้วย ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษารูปทรงข้าวหลามตัดต่อไปโดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระยะพิทช์ที่แตกต่างกันที่  $P_R=1.5, 2.0, 2.5$  โดยทำการศึกษาที่  $D_{R,i}=0.7, 0.8$

จากรูปที่ 5.66 และ 67 แสดงให้เห็นค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่  $D_{R,i}=0.7, 0.8$  ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มค่า  $P_R$  ทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าลดลงโดยค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดอยู่ที่  $P_R=2.5, D_{R,i}=0.8$  และ ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดที่  $P_R=1.5, D_{R,i}=0.7$  และที่  $P_R=2.0$  ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานอยู่ระหว่าง  $P_R=1.5$  และ  $2.0$  ที่  $D_{R,i}=0.7$  และ  $0.8$

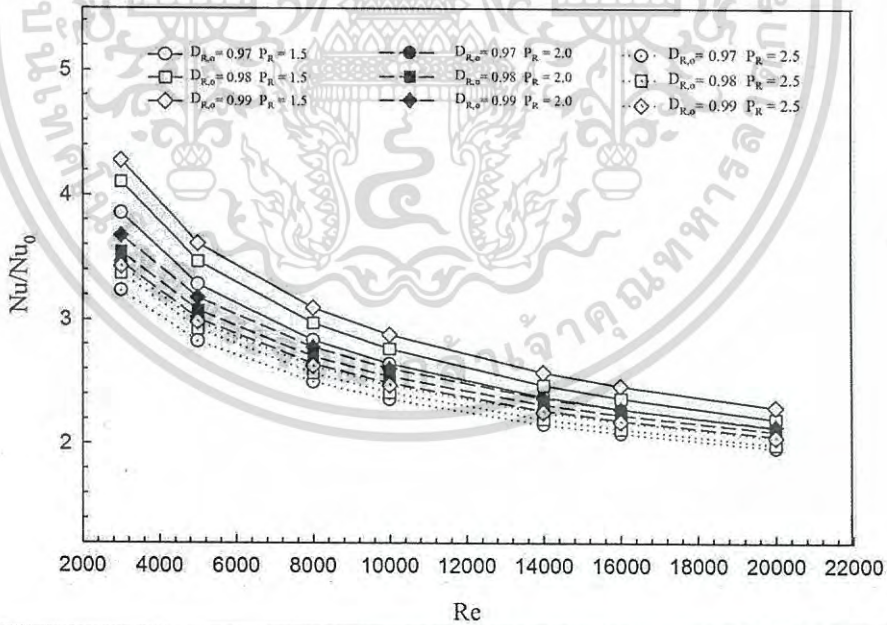
และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ที่เมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมที่  $D_{R,i}=0.7, 0.8$  แสดงในรูปที่ 5.68 และ 69 พบว่าที่  $P_R=1.5$  จะให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์สูงที่สุด และลดลงมาคือ  $P_R=2.0$  และ  $2.5$  ตามลำดับ โดยค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์สูงที่สุดเท่ากับ  $4.2$  เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ที่  $P_R=1.5, D_{R,i}=0.7$



รูปที่ 5.66 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่  $D_{R,i}=0.7$

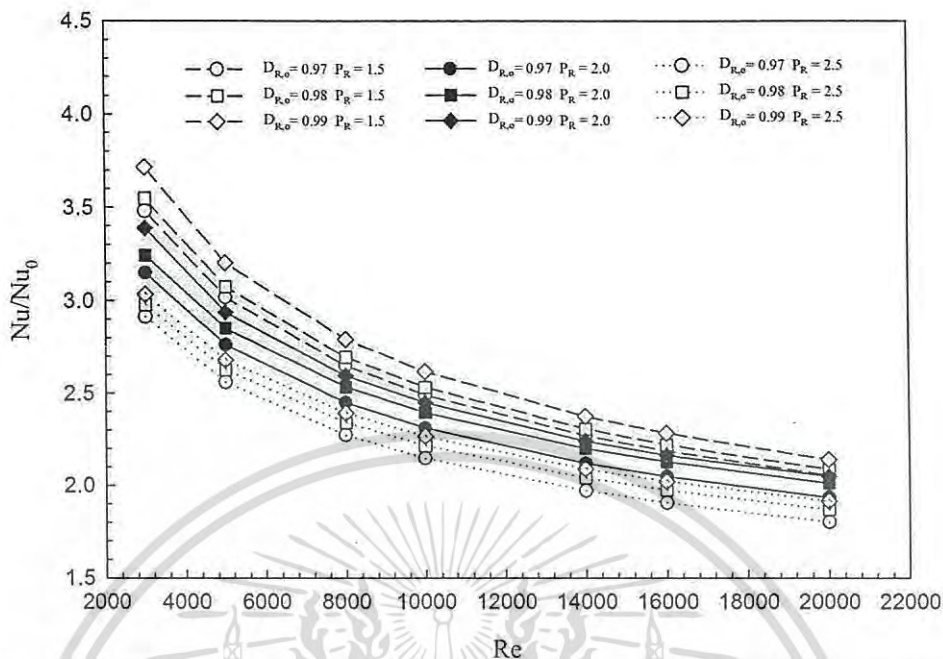


รูปที่ 5.67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่  $D_{R,i}=0.8$



รูปที่ 5.68 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่  $D_{R,i}=0.7$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

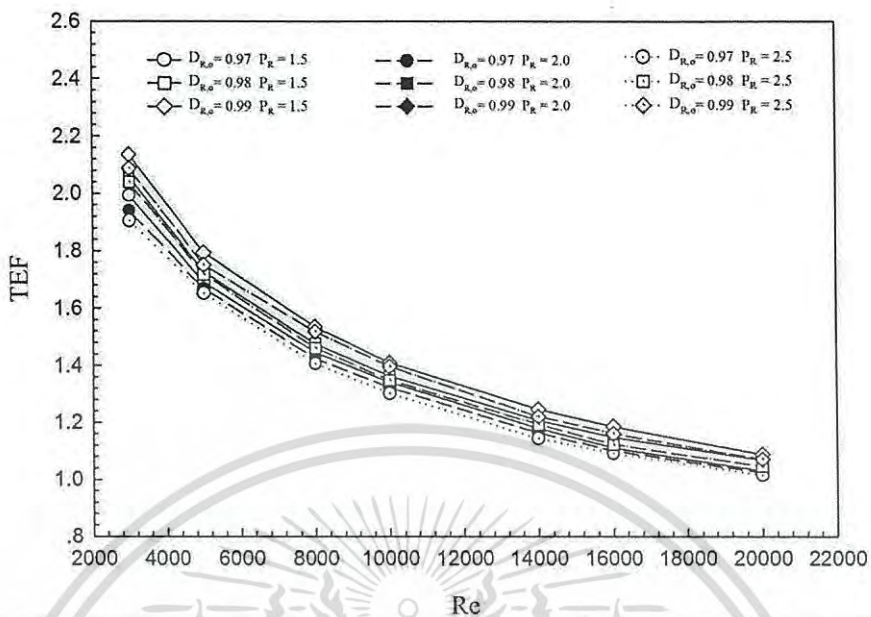


รูปที่ 5.69 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่  $D_{R,i}=0.8$

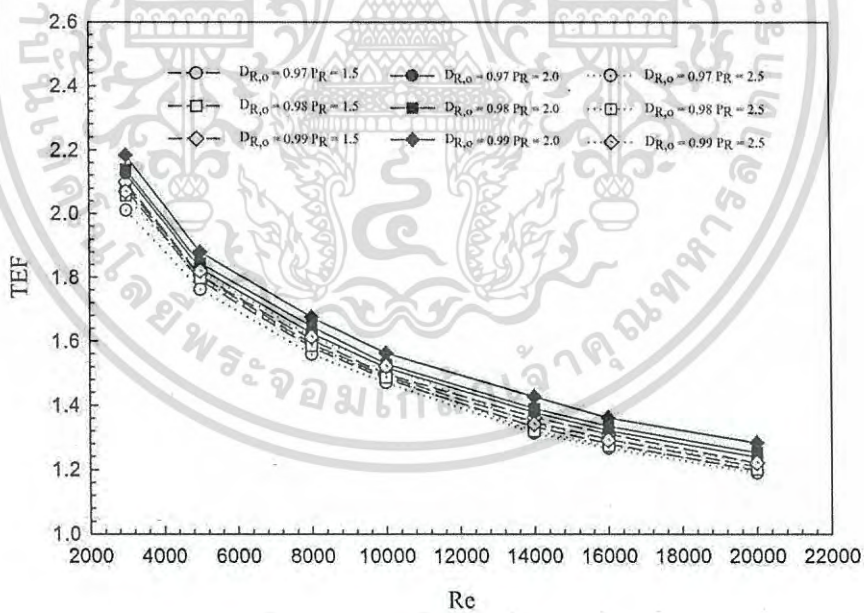
จากผลการศึกษาก็สามารถสรุปได้ว่าค่า  $P_R$  มีผลกับค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานและค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ โดยเมื่อ  $P_R$  จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ลดต่ำลง แต่เมื่อเพิ่ม  $P_R$  มีผลทำให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานลดลง

## 5.8 การปรับปรุงรูปทรงของแหวนทรงกรวยที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของรูปแบบปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบต่างๆที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5.1 จากการศึกษาพบว่า การปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 5 หรือทรงข้าวหลามตัดโดยตัดองศาที่ด้านทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวยเป็นการปรับปรุงแหวนทรงกรวยที่เหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาจากการศึกษาที่ผ่านมา เนื่องจากการปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบที่ 5 ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงแหวนทรงกรวยแบบอื่นๆ โดยตัดองศาที่มุม  $(\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ)$  และค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 2.20 ที่  $D_{R,i}=0.8$ ,  $D_{R,o}=0.99$ ,  $P_R=2$  และ  $Re=3,000$  และที่  $Re=20,000$  ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 1.26 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนดังรูปที่ 5.70 และ 5.71



รูปที่ 5.70 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่  $D_{R,i}=0.7$



รูปที่ 5.71 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ของแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ที่  $D_{R,i}=0.8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.9 การอภิปรายผลงานวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า การใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหล และสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิของของไหลทดสอบกับอุณหภูมิบริเวณผนังท่อ

จากการทำการศึกษาเมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมของผู้วิจัยพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของกระแสการไหลและเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่เนื่องจากการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมภายในท่อกลมทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้นจึงมีผลกับค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าอัตราการเพิ่มของค่าตัวประกอบเสียดทานที่เพิ่มขึ้นหลายเท่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกับการช่วยลดค่าตัวประกอบเสียดทานซึ่งได้ทำการศึกษาอัตราส่วนระยะพิทช์ อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าและทางออกของแหวนทรงกรวย และมุมมองค่าที่เหมาะสมในการปรับปรุงแหวนทรงกรวย จากการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้พบว่าการปรับปรุงแหวนทรงกรวยโดยตัดองศาที่ทางเข้าและทางออกเป็นรูปทรงข้าวหลามตัด ซึ่งเป็นรูปทรงที่ปรับปรุงแล้วเหมาะสมที่สุด โดยองศาที่ทางเข้าตัดที่มุม  $33.5^{\circ}$  และที่ทางออกของแหวนทรงกรวยที่มุม  $60^{\circ}$  โดยอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าแหวนทรงกรวยเท่ากับ 0.8 และทางออกของแหวนทรงกรวยเท่ากับ 0.99 ที่อัตราส่วนระยะพิทช์เท่ากับ 2 ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ 2.20 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่เรย์โนลด์ 3,000 และที่เรย์โนลด์ 20,000 ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.26 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

ผลที่ได้จากการศึกษาแหวนทรงกรวยที่ใส่ภายในท่อกลม โดยการปรับปรุงแหวนทรงกรวยในรูปแบบต่างๆ นั้น สามารถสรุปผลที่ได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลที่ได้จากการศึกษาหาแนวทรงกรวยเมื่อใส่ภายในท่อกลม

| ผลจากการศึกษา                | แบบมาตรฐาน<br>$D_{R1}=0.6,$<br>$D_{R0}=0.97,$<br>$P_R=2$ | แบบปรับปรุง 1<br>$(\alpha_1=30^\circ)$<br>$D_{R1}=0.6,$<br>$D_{R0}=0.97, P_R=2$ | แบบปรับปรุง 1<br>$(\alpha_1=27^\circ)$<br>$D_{R1}=0.6,$<br>$D_{R0}=0.97, P_R=2$ | แบบปรับปรุง 2<br>$(\alpha_1=30^\circ)$<br>$D_{R1}=0.6,$<br>$D_{R0}=0.97, P_R=2$ | แบบปรับปรุง 2<br>$(\alpha_1=26^\circ)$<br>$D_{R1}=0.6,$<br>$D_{R0}=0.97, P_R=2$ | แบบปรับปรุง 3<br>$(\alpha_1=17^\circ)$<br>$D_{R1}=0.6,$<br>$D_{R0}=0.97, P_R=2$ | แบบปรับปรุง 4<br>$(\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ)$<br>$D_{R1}=0.6, D_{R0}=0.97,$<br>$P_R=2$ | แบบปรับปรุง 4<br>$(\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ)$<br>$D_{R1}=0.6, D_{R0}=0.97,$<br>$P_R=2$ | แบบปรับปรุง 5<br>$(\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ)$<br>$D_{R1}=0.6, D_{R0}=0.97,$<br>$P_R=2$ | แบบปรับปรุง 5<br>$(\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ)$<br>$D_{R1}=0.6, D_{R0}=0.97,$<br>$P_R=2$ | แบบปรับปรุง 5<br>$(\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ)$<br>$D_{R1}=0.8, D_{R0}=0.99,$<br>$P_R=2$ |
|------------------------------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Nu/Nu_0$<br>( $Re=3,000$ )  | 3.21   | 3.55  | 3.44  | 3.79  | 3.76  | 3.11  | 3.33  | 3.10  | 3.56  | 3.14  | 3.41  |
| $Nu/Nu_0$<br>( $Re=14,000$ ) | 2.24   | 2.22  | 2.16  | 2.40  | 2.32  | 2.01  | 2.23  | 2.04  | 2.33  | 2.03  | 2.23  |
| $Nu/Nu_0$<br>( $Re=20,000$ ) | -  | -   | -   | -   | -   | -   | 2.03  | 1.85  | 2.12  | 1.83  | 2.04  |
| $ff/f_0$<br>( $Re=3,000$ )   | 72.81  | 18.57   | 14.67   | 11.98   | 7.67  | 3.99  | 6.31  | 4.82  | 6.52  | 4.06  | 3.70  |
| $ff/f_0$<br>( $Re=14,000$ )  | 83.81  | 22.97   | 16.87   | 14.18   | 8.22  | 4.16  | 6.75  | 5.15  | 7.40  | 5.16  | 4.03  |
| $ff/f_0$<br>( $Re=20,000$ )  | -  | -   | -   | -   | -   | -   | 6.99  | 5.33  | 7.88  | 5.76  | 4.21  |
| TEF<br>( $Re=3,000$ )        | 0.77   | 1.34  | 1.40  | 1.65  | 1.90  | 1.96  | 1.80  | 1.83  | 1.90  | 1.97  | 2.20  |
| TEF<br>( $Re=14,000$ )       | 0.51   | 0.78  | 0.84  | 0.99  | 1.15  | 1.25  | 1.18  | 1.18  | 1.2   | 1.24  | 1.40  |
| TEF<br>( $Re=20,000$ )       | -  | -   | -   | -   | -   | 1.063   | 1.061   | 1.061   | 1.066   | 1.09  | 1.26  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาอิทธิพลของแหวนทรงกรวยที่ใส่ในท่อกลมแบบลู่ออกที่มีต่อพฤติกรรมการไหล, ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อม การลดค่าความดันตกคร่อมโดยตัดองศาของแหวนทรงกรวย ซึ่งทำการศึกษาการไหลแบบปั่นป่วน ในช่วง  $Re=3000-20000$  โดยทำการปรับปรุงแหวนทรงกรวยทั้งหมด 5 แบบ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของ  $Re$ ,  $D_{R,i}$ ,  $D_{R,o}$ ,  $P_R$ ,  $\alpha$ , รูปทรงแหวนทรงกรวย ซึ่งผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 6.1.1 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์เมื่อใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลม

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของค่าเรย์โนลด์พบว่าเมื่อค่าเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $Nu/Nu_0$  มีแนวโน้มลดลง และ  $f/f_0$  มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เห็นได้จากผลการศึกษาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุงทั้ง 5 แบบ โดยแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 1 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ที่  $Re=3,000$  และ  $Re=14,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.55$  และ 2.22 ตามลำดับ และให้ค่า  $f/f_0=18.57$  และ 22.57 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 2 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ที่  $Re=3,000$  และ  $Re=14,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.79$  และ 2.40 ตามลำดับ และให้ค่า  $f/f_0=11.98$  และ 14.18 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_1=17^\circ$ ) ที่  $Re=3,000$  และ  $Re=14,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.11$  และ 2.01 ตามลำดับ และให้ค่า  $f/f_0=3.99$  และ 4.16 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) ที่  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.33$  และ 2.03 ตามลำดับ และให้ค่า  $f/f_0=6.31$  และ 6.99 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 4 ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ) ที่  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.10$  และ 1.85 ตามลำดับ และให้ค่า  $f/f_0=4.82$  และ 5.33 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=30^\circ-60^\circ$ ) ที่  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.56$  และ 2.12 ตามลำดับ และให้ค่า  $f/f_0=6.52$  และ 7.88 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=70^\circ-20^\circ$ ) ที่  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.14$  และ 1.83 ตามลำดับ และให้ค่า  $f/f_0=4.06$  และ 5.76 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่า  $Re$  เพิ่มขึ้นทำให้เกิดค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง นอกจากนี้ยังส่งผลถึงค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับกรณีที่ทำการศึกษ พบว่าที่  $Re=20000$  จะให้ค่า  $Nu/Nu_0$  น้อยที่สุด และ  $f/f_0$  สูงที่สุด นอกจากค่าเรย์โนลด์จะมีผลต่อ  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  แล้ว ค่าเรย์โนลด์ยังมีผลต่อความปั่นป่วนของการไหลอีกด้วยโดยเมื่อค่าเรย์โนลด์สูงขึ้นทำให้เกิดการปั่นป่วนของการไหลมากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามก็ยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานหรือค่าความดันตกคร่อมสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

#### 6.1.2 อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแหวนทรงกรวยที่ทางเข้า

อิทธิพลของอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า  $D_{R,i}$  พบว่าเมื่อค่า  $D_{R,i}$  เพิ่มมากขึ้น ค่า  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  ก็จะมีค่าลดลง จากการศึกษาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ที่  $D_{R,i}=0.7$ ,  $D_{R,o}=0.98$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.54$  และ 2.09 ตามลำดับ และให้ค่า  $f/f_0=5.67$  และ 6.18 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=$

$33.5^\circ-60^\circ$ ) ที่  $D_{R,i}=0.8$ ,  $D_{R,o}=0.98$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.24$  และ 2.01 ตามลำดับ และให้ค่า  $ff_0=3.63$  และ 4.14 ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า  $D_{R,i}$  เพิ่มมากขึ้นค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมก็จะมีค่าลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่า  $D_{R,i}$  ทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากทำให้ค่าความดันตกคร่อมลดลงมากกว่าค่าการถ่ายเทความร้อนที่ลดลงดังนั้นการเพิ่มขนาดก็ยังเป็นกรณีศึกษาที่น่าสนใจ

### 6.1.3 อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแหวนทรงกรวยที่ทางออก

อิทธิพลของอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก  $D_{R,o}$  เมื่อพิจารณาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ที่  $D_{R,o}=0.98$ ,  $D_{R,i}=0.8$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.24$  และ 2.01 ตามลำดับ และให้ค่า  $ff_0=3.63$  และ 4.14 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ที่  $D_{R,o}=0.99$ ,  $D_{R,i}=0.8$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.41$  และ 2.04 ตามลำดับ และให้ค่า  $ff_0=3.70$  และ 4.21 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าเมื่อค่า  $D_{R,o}$  เพิ่มมากขึ้น ค่า  $Nu/Nu_0$  และ  $ff_0$  ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า  $D_{R,o}$  เพิ่มมากขึ้นค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย

### 6.1.4 อิทธิพลของอัตราส่วนระยะพิตช์

อิทธิพลของระยะพิตช์  $P_R$  เมื่อพิจารณา  $P_R=1.5$  ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ที่  $D_{R,o}=0.99$ ,  $D_{R,i}=0.8$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.54$  และ 2.08 ตามลำดับ และให้ค่า  $ff_0=4.90$  และ 5.41 ตามลำดับ เมื่อพิจารณา  $P_R=2.0$  ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ที่  $D_{R,o}=0.99$ ,  $D_{R,i}=0.8$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.41$  และ 2.04 ตามลำดับ และให้ค่า  $ff_0=3.70$  และ 4.21 ตามลำดับ เมื่อพิจารณา  $P_R=2.5$  ของท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 5 ( $\alpha_1-\alpha_2=33.5^\circ-60^\circ$ ) ที่  $D_{R,o}=0.99$ ,  $D_{R,i}=0.8$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=20,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.03$  และ 1.91 ตามลำดับ และให้ค่า  $ff_0=3.15$  และ 3.49 ตามลำดับ พบว่าเมื่อค่า  $P_R$  เพิ่มมากขึ้น ค่า  $Nu/Nu_0$  และค่า  $ff_0$  มีค่าลดลงที่ค่า  $P_R$  ต่ำๆ จะให้ค่า  $Nu/Nu_0$  ที่สูงและที่  $P_R$  สูงๆ จะให้ค่า  $ff_0$  ต่ำ เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่า  $P_R$  ทำให้ลักษณะการไหลของของไหลเกิดความปั่นป่วนการไหลหมุนวนมากขึ้นแต่อย่างไรก็ตามก็ยังให้ค่าความดันตกคร่อมที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

### 6.1.5 อิทธิพลของมุมตัดหรือมุมที่ทำการปรับปรุงแหวนทรงกรวย

อิทธิพลของมุมตัด เมื่อพิจารณาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_1=30^\circ$ ) ที่  $D_{R,o}=0.97$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=14,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.79$  และ 2.40 ตามลำดับ และให้ค่า  $ff_0=11.98$  และ 14.18 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาแหวนทรงกรวยแบบปรับปรุง 3 ( $\alpha_1=26^\circ$ ) ที่  $D_{R,o}=0.97$ ,  $D_{R,i}=0.6$ ,  $Re=3,000$  และ  $Re=14,000$  ให้ค่า  $Nu/Nu_0=3.72$  และ 2.32 ตามลำดับ และให้ค่า  $ff_0=7.67$  และ 8.22 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าที่การตัดองศาให้มีขนาดมุมเล็กๆ ช่วยให้ค่าความดันตกคร่อมลดลงและค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงด้วย แต่เมื่อเทียบกับค่าความดันตกคร่อมที่ลดลงมากกว่าการตัดองศาให้มีขนาดเล็กมีผลทำให้ช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนได้

### 6.1.6 อิทธิพลของการปรับปรุงแหวนทรงกรวย

สำหรับการพัฒนาแหวนทรงกรวยโดยมีจุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมโดยใช้การตัดองศาแหวนทรงกรวย ซึ่งทรงข้าวหลามตัด (แบบปรับปรุงแหวนทรงกรวย 5) พบว่าจะช่วยลดค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นได้ดีที่สุด นอกจากนี้แบบปรับปรุงแหวนทรงกรวย 5 เมื่อใส่ภายในท่อกลมยังช่วยให้ค่าการกระจายของการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวท่อและบริเวณปลายตัดมีค่ามากขึ้น จึงทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากของไหลทดสอบเกิดความปั่นป่วนมากขึ้นและสามารถไหลเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นการปรับปรุงแหวนทรงกรวย 5 จึงให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมากที่สุดที่ 2.20

### 6.2 ข้อเสนอแนะการพัฒนางานวิจัย

จากผลงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้ทราบว่า การใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับพฤติกรรมการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อม มีข้อดีเนื่องจากสามารถช่วยประหยัดเวลาที่ใช้ในการจำลองการไหล สามารถช่วยลดต้นทุนสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นเพียงการทำนายถึงผลการจำลองที่มีความเป็นไปได้ สำหรับการนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ศึกษาไปใช้งานจริงนั้นค่าสมรรถนะทางความร้อนที่ได้ยังขึ้นอยู่กับความถูกต้องและแม่นยำของเครื่องมือวัดที่นำมาใช้ทำการศึกษาคด้วย

สำหรับแนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อไปนั้น เมื่อพิจารณาการใส่แหวนทรงกรวยภายในท่อกลมสามารถสร้างความปั่นป่วนของการไหล สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ จึงเป็นกรณีที่น่าสนใจ แต่เนื่องจากในการศึกษาแหวนทรงกรวยภายในท่อกลมนั้นยังให้ค่าความดันตกคร่อมที่สูงจึงมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนยังไม่สูงมากนัก จากการศึกษาพบว่าองศาในการตัดมีผลกับการลดค่าความดันตกคร่อมได้ดี ดังนั้นจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจต่อการนำไปศึกษาในอนาคตสำหรับการปรับปรุงแหวนทรงกรวยต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พงษ์เจต พรหมวงศ์. 2542. การถ่ายเทความร้อน. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 167–252.
- [2] 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* (78): 273–288.
- [3] Promvongse, P., 2008. “Heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts” *Energy Conversion and Management* (49): 8–15
- [4] Kongkaipaiboon et al., 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* (37): 560 -567
- [5] 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* (38): 668–671.
- [6] 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* (44): 64-68.
- [7] 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* : 180–186.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

| $T$<br>(K) | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $C_p$<br>(kJ/kg.K) | $\mu \times 10^7$<br>(N.s/m <sup>3</sup> ) | $\nu$<br>(m <sup>2</sup> /s) | $k \times 10^6$<br>(W/m.K) | $\alpha \times 10^6$<br>(m <sup>2</sup> /s) | $Pr$  |
|------------|--------------------------------|--------------------|--|------------------------------|----------------------------|---|-------|
| อากาศ      |                                |                    |  |                              |                            |   |       |
| 100        | 3.25562                        | 1.032              | 71.1                                       | 2.0                          | 9.34                       | 2.54  | 0.786 |
| 150        | 2.3364                         | 1.012              | 103.4                                      | 4.426                        | 13.8                       | 5.84  | 0.758 |
| 200        | 1.7458                         | 1.007              | 132.5                                      | 7.59                         | 18.1                       | 10.3  | 0.737 |
| 250        | 1.3947                         | 1.006              | 159.6                                      | 11.44                        | 22.3                       | 22.5  | 0.707 |
| 300        | 1.1614                         | 1.007              | 184.6                                      | 15.89                        | 26.3                       | 22.5  | 0.707 |
| 350        | 0.990                          | 1.009              | 208.2                                      | 20.92                        | 30.0                       | 29.9  | 0.700 |
| 400        | 0.8711                         | 1.014              | 230.1                                      | 26.41                        | 33.8                       | 38.3  | 0.690 |
| 450        | 0.7740                         | 1.021              | 250.7                                      | 32.39                        | 37.3                       | 47.2  | 0.686 |
| 500        | 0.6964                         | 1.030              | 270.1                                      | 38.79                        | 40.7                       | 56.7  | 0.684 |
| 550        | 0.6329                         | 1.040              | 288.4                                      | 45.57                        | 43.9                       | 66.7  | 0.683 |
| 600        | 0.5804                         | 1.051              | 305.8                                      | 52.69                        | 46.9                       | 76.9  | 0.685 |
| 650        | 0.5356                         | 1.063              | 322.5                                      | 60.21                        | 49.7                       | 87.3  | 0.690 |
| 700        | 0.4975                         | 1.075              | 338.8                                      | 68.10                        | 52.4                       | 98.0  | 0.695 |
| 750        | 0.4643                         | 1.087              | 354.6                                      | 76.37                        | 54.9                       | 109   | 0.702 |
| 800        | 0.4354                         | 1.099              | 369.8                                      | 84.93                        | 57.3                       | 120   | 0.709 |
| 850        | 0.4097                         | 1.110              | 384.3                                      | 93.80                        | 59.6                       | 131   | 0.716 |
| 900        | 0.3868                         | 1.121              | 398.1                                      | 102.9                        | 62.0                       | 143   | 0.720 |
| 950        | 0.3666                         | 1.131              | 441.3                                      | 112.2                        | 64.3                       | 155   | 0.723 |
| 1000       | 0.3482                         | 1.141              | 424.4                                      | 121.9                        | 67.7                       | 168   | 0.726 |
| 1100       | 0.3166                         | 1.159              | 449.0                                      | 141.8                        | 71.5                       | 195   | 0.728 |
| 1200       | 0.2902                         | 1.175              | 473.0                                      | 162.9                        | 76.3                       | 224   | 0.728 |
| 1300       | 0.2679                         | 1.189              | 496.0                                      | 185.1                        | 82                         | 238   | 0.719 |
| 1400       | 0.2488                         | 1.207              | 530  | 213                          | 91                         | 303   | 0.703 |
| 1500       | 0.2322                         | 1.230              | 557  | 240                          | 100                        | 350   | 0.685 |
| 1600       | 0.2177                         | 1.248              | 584  | 268                          | 106                        | 390   | 0.688 |
| 1700       | 0.2049                         | 1.267              | 611  | 298                          | 113                        | 435   | 0.685 |
| 1800       | 0.1935                         | 1.286              | 637  | 329                          | 120                        | 482   | 0.683 |
| 1900       | 0.1833                         | 1.307              | 663  | 362                          | 128                        | 534   | 0.677 |
| 2000       | 0.1741                         | 1.337              | 689  | 296                          | 137                        | 589   | 0.672 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ME NETT 28  
KHON KAEN UNIVERSITY

The 28<sup>th</sup> Conference of  
Mechanical Engineering Network of Thailand  
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล  
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28  
วันที่ 15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

"Driving ME  
Research  
Education  
and Innovation  
Towards Creative  
Economy"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนในท่อกลมที่สอดใส่  
แหวนรูปกรวย Conical rings  
Numerical simulation of turbulent heat transfer in a round tube with  
conical-rings inserts

ประกายดาว เงินวัน, วิหิตา เจษฎารัตนชัย\* และ พงษ์เจต พรหมวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520  
\*อีเมล์: igwithad@kmitl.ac.th


**บทคัดย่อ**

ตัวสร้างการไหลปั่นป่วนชนิด conical ring ถูกใช้เพื่อสร้างการไหลหมุนวนในท่อ ส่งผลให้การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากขึ้น งานวิจัยนี้นำเสนออิทธิพลของ conical ring ที่ติดตั้งในท่อกลมทั้งในส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทาน ทำการศึกษาด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขสามมิติ สำหรับ conical ring ที่มีค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนการขวางการไหล ( $Dr = D_i/D$ ) เท่ากับ 0.3, 0.5, 0.6 และ 0.7 ที่อัตราส่วนระยะพิททิงที่ ( $PR = 2$ ) ศึกษาในช่วงเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 3000 ถึง 20000 ในท่อที่มีประสิทธิภาพความร้อนที่ผิวคงที่ ผลจากการศึกษาเสนอในรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในรูปของเลขนัสเซิลและค่าตัวประกอบเสียดทาน ตามลำดับ ผลจากการศึกษาเชิงตัวเลขพบว่า conical ring ที่ติดตั้งในท่อกลม ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะที่อัตราส่วนการขวางการไหล ( $Dr = D_i/D$ ) เท่ากับ 0.7 จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด แฉงอย่างไรก็ตาม การใช้ conical ring ไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนแต่ยังส่งผลให้ตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูง

คำหลัก: การถ่ายเทความร้อน, แหวนรูปกรวย, ค่าเลขเรย์โนลด์, ฟลักซ์ความร้อน

**Abstract**

The conical rings are used as turbulators for produce the vortex flows lead to the heat transfer augmentation. The effects of the conical ring inserted in the round tube on the heat transfer rate and pressure loss are major studied in this present. The conical rings with different diameter ratios, ( $Dr = D_i/D = 0.3, 0.5, 0.6$  and  $0.7$ ) for a single pitch ratio, ( $PR = 2$ ) are investigated numerically in three dimensional. The computation is carried out by varying the airflow rate for Reynolds number ranging from 3000-20000 in the tested section with a constant surface heat flux. The effects of conical ring on heat transfer and pressure drop are shown in terms of Nusselt number and friction factor, respectively, and the results obtained are compared with smooth round tube with no conical-ring. The numerical results show that the conical-rings inserted in the round tube lead to higher heat transfer rate than that of the smooth tube, especially the conical rings with diameter ratio of 0.7 give the highest heat transfer rate. However, the



# การถ่ายเท พลังงานความร้อนและมวล

ในอนุกรมด้านความร้อนและกระบวนการ  
 (ครั้งที่ 15)  
 ระหว่างวันที่ 30-31 มีนาคม 2559  
 ณ โรงแรม แอล รีสอร์ท สมุย  
 จังหวัดสุราษฎร์ธานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการ เรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล  
ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 15)  
ระหว่างวันที่ 30-31 มีนาคม 2559 ณ โรงแรม เมล รีสอร์ท สมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ใส่  
แหวนทรงกรวยตัด

NUMERICAL STUDY OF TURBULENT FLOW AND HEAT TRANSFER IN A ROUND  
TUBE WITH TRUNCATED CONICAL-RINGS

ประกายดาว เงินวัน

พงษ์เจต พรหมวงศ์

วาทัญญู ไทโจงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร 10520

Email: kpongjet@gmail.com

บทคัดย่อ

ตัวสร้างการไหลปั่นป่วนชนิด conical ring ที่ตัดแปลงจากแบบดั้งเดิมโดยการตัดทำมุม  $30^\circ$  กับแนวระนาบถูกใช้เพื่อสร้างการไหลหมุนวนในท่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า ( $D_{R_i} = 0.6$ ) และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก ( $D_{R_o} = 0.9, 0.95$  และ  $0.97$ ) ค่าอัตราส่วนระยะพิลด์ซึ่งที่ ( $P_R = 2$ ) ศึกษาในเชิงเลขคณิตในแลตซ์เท่ากับ 3000 ถึง 14000 ในท่อที่มีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ผลจากการศึกษาเสนอในรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในรูปของเลขนัสเซลและค่าตัวประกอบเสียดทาน ตามลำดับ ผลจากการศึกษาเชิงตัวเลขพบว่า conical ring ที่ติดตั้งในท่อกลมช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ โดยเฉพาะที่ modify ที่  $30^\circ$  ส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ conical ring แบบดั้งเดิม และอัตราส่วนการวางการไหล ( $D_{R_i} = 0.6$ ) และ เส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยทางออก ( $D_{R_o} = 0.97$ ) จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด การใช้ conical ring ไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนแต่ยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูง

คำหลัก: ค่าเลขเรย์โนลด์, การถ่ายเทความร้อน, แหวนทรงกรวย, ฟลักซ์ความร้อน

Abstract

The truncated conical rings modified from the typical conical ring by cutting the cone-tip at  $30^\circ$  are used as a turbulator for producing the vortex flows to enhance the heat transfer rate in a tube. The conical rings having inlet diameter ratio, ( $D_{R_i} = d_i/D = 0.6$ ) and outlet diameter ratios, ( $D_{R_o} = d_o/D = 0.9, 0.95$  and  $0.97$ ) at a single pitch ratio, ( $P_R = 2$ ) are introduced. The computation is carried out by varying the airflow rate for Reynolds number ranging from 3000 to 14,000 in the test section with a constant surface heat flux. The effects of the conical ring insert on heat transfer and pressure drop are shown in terms of Nusselt number and friction factor, respectively. The numerical results show that the modified conical-ring insert leads to higher heat transfer rate than the typical conical ring and the smooth tube alone and also provides less friction factor than the typical one. The  $D_{R_o} = 0.97$  gives the highest heat transfer rate. The use of the conical rings not only affects the increase in heat transfer rate, but also increases the pressure loss.

Keywords: Reynolds number, heat transfer, conical ring, heat flux

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

เนื่องจากการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านการถ่ายเทความร้อน การมีระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีจะส่งผลอย่างมากต่อการประหยัดพลังงาน ซึ่งจากการศึกษาทางวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การสร้างความปั่นป่วนให้กับการไหลของของไหลที่จะไปช่วยในการลดชั้นขีดผิวซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ได้ผลดีในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน

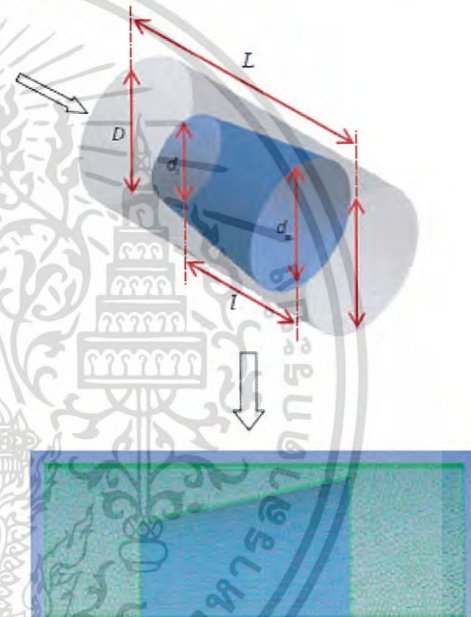
จึงมีผู้นำเสนอหลักการของการไหลที่มีการปรับตัวเพิ่มเติมในท่อ (Fully develop) และมีการไหลแบบเป็นคาบ (Periodic) ที่ทำการศึกษาโดย Patankar และคณะ [1] ได้ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลและพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนในท่อโดยการเพิ่มตัวสร้างการไหลปั่นป่วนในลักษณะต่าง ๆ โดยการใช้อุปกรณ์คำนวณเชิงคณิตศาสตร์หรือการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข Muthusamy และคณะ [2] ซึ่งศึกษาผลของอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนรูปกรวยต่อการถ่ายเทความร้อนและปัจจัยความเสียดทาน จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการสอดตัวสร้างความปั่นป่วนรูปกรวยภายในท่อกลมช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น Yakut และคณะ [3] ยังได้ศึกษาผลกระทบของตัวสร้างความปั่นป่วนต่อการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน, ความดันตกคร่อมและการไหลที่เกิดจากการสั่นสะเทือน Anvan และคณะ number Promvong [4] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมกับการแทรกแหวนทรงกรวย จากการทดลองพบว่าแหวนทรงกรวยมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและปัจจัยแรงเสียดทาน การจัดวางแหวนทรงกรวยส่งผลให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น โดยเฉพาะการจัดวางแบบ CR, DR และ CDR ทำให้ค่า Nusselt เพิ่มขึ้นถึง 197%, 333% และ 237% ตามลำดับ Elamsaard และคณะ [5] ได้ศึกษาเชิงการทดลองของการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทานการไหลในท่อที่มีการติดตั้งกรวยพุ่ม โดยศึกษาที่อัตราส่วนระยะพิทช์ ( $PR = 4, 6$  และ  $12$ ) และจำนวนพุ่มที่ต่างกันที่ ( $N = 4, 6$  และ  $8$  รูป) ทำการศึกษาที่ค่าเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 4000-20000 โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ พบว่าการสอดใส่ Conical ring มีผลช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น และจำนวนพุ่มของกรวยก็ส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของท่อด้วยเช่นกัน โดยการสอดใส่กรวยพุ่มเข้าไปภายในท่อ สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 137% เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีการสอดใส่ครีบ และทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประมาณ 0.92 ที่  $PR = 4$  และ  $PR = 8$  ที่ค่าเรย์โนลด์เท่ากับ 4000 [6] ได้ทำการวิจัยเชิงทดลองเกี่ยวกับการถ่ายโอนความร้อนของน้ำในท่อกับแหวนทรงกรวยแทรกภายใน พบว่าตัวสร้างความปั่นป่วนรูปกรวยยังมีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอีกด้วย โดย การจัดวางแบบ DR มีค่า Nusselt Number เพิ่มขึ้นจาก 141% ถึง 355% ขึ้นอยู่กับค่า Reynolds number ในทางกลับกันสำหรับการจัดวางแบบ DR ให้ค่า Nusselt Number เพิ่มขึ้นจาก 171% ถึง 521% ขึ้นอยู่กับค่า Reynolds

จากการศึกษาทางวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใส่แหวนทรงกรวยเข้าไปภายในท่อกลมมีผลในการสร้างความปั่นป่วนให้แก่การไหล และยังทำให้ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีการใส่ครีบรูปกรวยเข้าไปภายใน

## 2. โครงสร้างการไหลและสมการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1. ระบบท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวย

ระบบที่ได้ทำการศึกษาเป็นการศึกษาท่อกลมที่มีการใส่แหวนทรงกรวยโดยอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า  $D_{r,i} = d_i/D = 0.6$  และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก  $D_{r,o} = d_o/D = 0.9, 0.95$  และ  $0.97$  ตามลำดับ ที่อัตราส่วนระยะพิทช์  $PR = LD = 2$  ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพิจารณาการไหลแบบ periodic ซึ่งมีการใส่แหวนทรงกรวยแบบตั้งเดิมซึ่งมีความยาวกรวย =  $l$  โดยให้ปลายกรวยตั้งชี้ทวนกระแสการไหล



รูปที่ 1 ท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยแบบตั้งเดิมโดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบชี้ทวนกระแสการไหลและโดเมนที่ใช้ในการคำนวณโดยคิดการไหลแบบ periodic

### 2.2. สมมติฐานและสมการในการคำนวณ

จากการวิจัยได้ศึกษาโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume method) ด้วยแบบจำลองการไหล 3 มิติ ที่มีการไหลแบบปั่นป่วน เป็นการไหลแบบคงตัวและไม่สามารถอัดตัวได้ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3000 ถึง 14,000 โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ไม่คำนึงแรงวิคฤและการสูญเสียเนื่องจากความหนืด ใช้

แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable  $k-\epsilon$  พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection) ไม่คำนึงการแผ่รังสีความร้อน โดยทำการศึกษาการไหลในท่อกลม ที่มีการให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังท่อ โดยใช้แหวนทรงกรวยที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า  $D_{r,i} = 0.5, 0.6$  และ  $0.7$  อัตราส่วนระยะพิทช์  $P_r = 2$  ลักษณะการติดตั้งเหมือนดังรูปที่ 1 สำหรับการไหลในท่อกลมสมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน สามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนดังนี้

สมการความต่อเนื่อง:

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

สมการโมเมนตัม:

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

สมการพลังงาน:

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

เมื่อ  $\Gamma$  คือ การแพร่ทางความร้อน กำหนดโดย

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

สมการควบคุมทั้งหมดจะทำการคำนวณหาผลเฉลยตามระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องโดยแผนผังวิธีแบบ SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations) ในการสุ่มเข้าหาคำตอบจะพิจารณาที่ความแตกต่างของค่าการแปรเปลี่ยนน้อยกว่า  $10^{-5}$  ของทุกตัวแปร

ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรที่ให้ความสนใจอยู่ 4 ตัวแปร คือ เลขเรย์โนลด์ ตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซลท์ และ สมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งค่าเลขเรย์โนลด์นิยามโดย

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

เมื่อ  $\bar{V}$  และ  $\nu$  คือความเร็วเฉลี่ยและความหนืดจลน์ของอากาศตามลำดับ

ค่าความดันสูญเสียแสดงในรูปของตัวประกอบเสียดทาน,  $f$  สามารถได้จากความดันตกคร่อม,  $\Delta P$  ตลอดช่วงความยาว periodic ของท่อกลม,  $L$  และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลม  $D$

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

การถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปของตัวแปรไร้มิติคือค่าเลขนัสเซลท์ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

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

สมรรถนะเชิงความร้อน, TEF

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

เมื่อ  $Nu_0$  และ  $f_0$  คือ เลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ ตามลำดับ

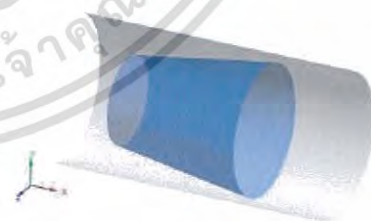
### 2.3. เงื่อนไขขอบเขตของการศึกษา

ขอบเขตของการศึกษาได้ทำการพิจารณาทางเข้าและทางออกเป็นแบบ periodic translation สมมติอากาศที่ 300 K ไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ รูปร่างความเร็วทางเข้าและทางออกเหมือนกันสมมติคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าเงื่อนไขขอบเขตไม่มีการลื่นไถลที่ผนัง (no-slip conditions) หรือความเร็วที่ผนังมีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นผนังที่อยู่กับที่ (stationary wall) กำหนดให้ที่ผนังของท่อกลมมีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ 600 W/m<sup>2</sup> ให้แหวนทรงกรวยเป็นแบบความร้อนไม่สามารถผ่านได้

### 3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

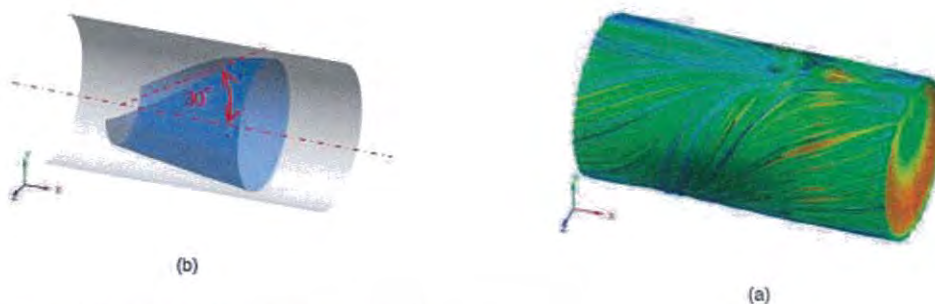
#### 3.1. รูปแบบแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม และ แบบดัดแปลงมุมกรวยที่ 30

จากการศึกษาได้ทำการทดสอบแหวนทรงกรวยภายในท่อกลม 2 แบบ คือ แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม และ แหวนทรงกรวยที่ดัดแปลง โดยกำหนดค่า  $D_{r,i} = 0.6$  และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูปกรวยที่ทางออก  $D_{r,o} = 0.9, 0.95$  และ  $0.97$  ตามลำดับ ที่อัตราส่วนระยะพิทช์  $P_r = L/D = 2$  ซึ่ง มุมกรวยอยู่ที่ 30 องศาแสดงในรูปที่ 2



(a)

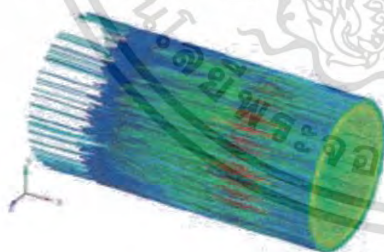
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



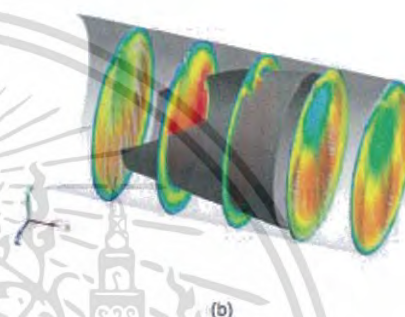
รูปที่ 2 ลักษณะการไหลแหวนทรงกรวยในท่อกลม (a) รูปแบบการไหลแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม (b) รูปแบบการไหลแหวนทรงกรวยแบบดัดแปลงมุมกรวย 30 องศา

### 3.2. พฤติกรรมการไหล

ลักษณะของการไหลในท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า  $D_{r_i} = 0.6$  และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก  $D_{r_o} = 0.9, 0.95$  และ  $0.97$  อัตราส่วนระยะพิทช์  $P_r = 2$  และตัวเลขเรย์โนลด์ส  $Re = 3000$  ถึง  $14000$  จากรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างการไหลของอากาศภายในท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม โดยจัดวางแหวนทรงกรวยแบบรั้วทวนกระแสการไหล พบว่าเมื่ออากาศไหลผ่านท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม ทำให้กระแสการไหลเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนจึงเป็นผลต่อเนื่องให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมยังทำให้เพิ่มค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นที่มาของการ ดัดแปลงแหวนทรงกรวยที่ 30 องศา เพื่อลดค่าตัวประกอบเสียดทาน โดยลักษณะของการไหลในท่อกลมเมื่อดัดแปลง แหวนทรงกรวยดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 กระแสการไหลของของไหลภายในท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมโดยจัดวางแหวนทรงกรวยรั้วทวนกระแสการไหล



รูปที่ 4 กระแสการไหลของของไหลภายในท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดัดแปลงมุมกรวยที่ 30 องศา (a) แสดงลักษณะการไหลแบบ 3 มิติ (b) แสดงลักษณะการไหลแบบ 2 มิติ

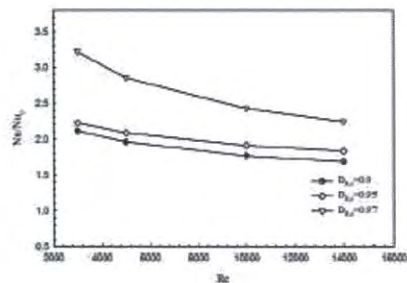
### 3.3. พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการใส่แหวนรูปแบบดั้งเดิมช่วยเพิ่มการปั่นป่วนของกระแสการไหลแต่ยังไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับการดัดแปลงมุมกรวยที่ 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อดัดแปลงแหวนทรงกรวยที่ 30 องศา เกิดความปั่นป่วนของกระแสการไหลเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าและแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม

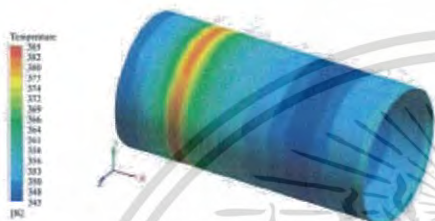
รูปที่ 5 แสดงลักษณะค่าการกระจายอุณหภูมิที่ผิวท่อสำหรับกรณีท่อเปล่าผิวเรียบพบว่าท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีการใส่แหวนทรงกรวยจึงไม่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังท่อทำให้ผิวท่อยังคงเป็นสีแดงเนื่องจากยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ และเมื่อทำการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผนังท่อ ทำให้ผนังท่ออุณหภูมิลดลงแต่ยังไม่มากนัก ยังมีบางบริเวณที่ยังแลกเปลี่ยนอุณหภูมิได้น้อยเช่นที่บริเวณทางเข้าของกรวย จึงได้ทำการดัดแปลงมุมกรวยที่ 30 องศา เพื่อช่วยให้การกระจายการลดอุณหภูมิมีบริเวณมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7



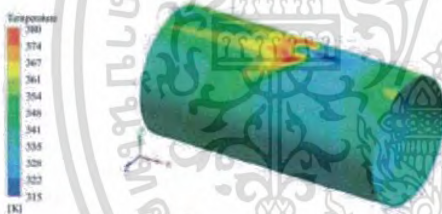
รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิที่บริเวณผนังท่อกลมที่ไม่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวย



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์สของท่อที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม



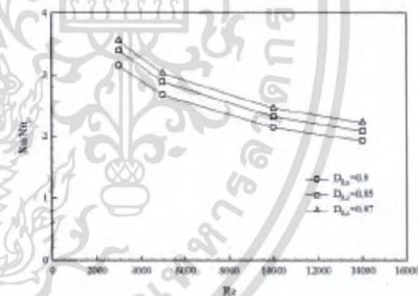
รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิที่บริเวณผนังท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมที่  $D_{ro} = 0.97$



รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิที่บริเวณผนังท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดัดแปลงมุมกรวยที่ 30 องศา ที่  $D_{ro} = 0.97$

รูปที่ 8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม จากการศึกษาผลที่ได้พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยที่ทางออกมีผลทำให้เลขนัสเซลมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จากกราฟพบว่าค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลของ  $D_{ro} = 0.6$  ที่พิจารณาในช่วงเลขเรย์โนลด์ส 3000 ถึง 14000 ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลอยู่ในช่วง 1.92 - 3.52 โดยที่  $D_{ro} = 0.97$  และ  $Re = 3000$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลสูงที่สุดที่ 3.2 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบไม่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวย ภายใน

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดัดแปลงมุมกรวยที่ 30 องศาที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า  $D_{ri} = 0.6$  และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออก  $D_{ro} = 0.9, 0.95$  และ  $0.97$  ที่อัตราส่วนระยะพิทช์  $P_r = 2$  โดยพิจารณาที่ค่า  $Re = 3000$  ถึง 14000 จากรูปพบว่าเมื่อทำการดัดแปลงมุมกรวย ทำให้ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยที่  $D_{ro} = 0.6$  และ  $D_{ro} = 0.97$  ที่  $Re = 3000$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลสูงที่สุดที่ 3.52 เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีการใส่แหวนทรงกรวยและเมื่อเทียบกับการใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม การดัดแปลงมุมกรวยที่ 30 องศา ยังช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายความร้อนเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

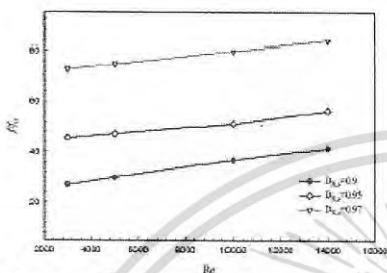


รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลกับเลขเรย์โนลด์สที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยดัดแปลงมุม 30 องศา

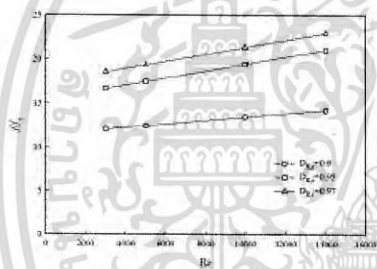
3.4 การสูญเสียความดัน

สำหรับค่าความดันสูญเสียหรือค่าความดันตกคร่อมแสดงไว้ในรูปของอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทาน พบว่าแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงขึ้นเมื่อค่า  $D_{ro}$  เพิ่มมากขึ้น และค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อค่า  $D_{ro}$  ลดลง ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 10 โดยที่ค่า  $D_{ri} = 0.6$  และ

$D_{R_0} = 0.97$  ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดที่ 83.8 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ แต่เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นเหตุผลให้ทำการติดตั้งแหวนทรงกรวยที่มุม 30 องศาเพื่อลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน จากรูปที่ 11 พบว่าเมื่อทำการติดตั้งมุมกรวยที่ 30 องศาช่วยลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเมื่อเทียบกับแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม โดยค่า  $D_{R_0} = 0.6$  และ  $D_{R_0} = 0.97$  ให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดที่ 22.9 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบที่ไม่มีการใช้แหวนทรงกรวยภายในท่อ



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับ Re ที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม



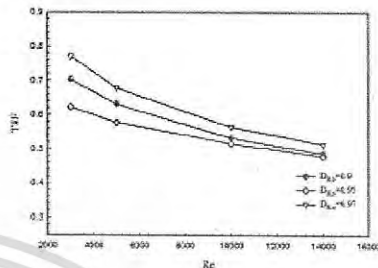
รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับ Re ที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยติดตั้งมุม 30 องศา

3.5 สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

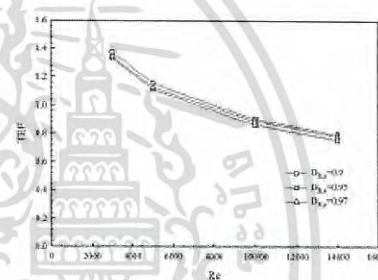
รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า  $D_{R_0} = 0.6$  โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิชช  $P_R = 2$  ที่ค่า  $Re = 3000$  ถึง  $14000$  พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของ  $D_{R_0} = 0.6$  และ  $D_{R_0} = 0.9, 0.95$  และ  $0.97$  อยู่ในช่วง  $0.48 - 0.77$

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์สของท่อกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบติดตั้งมุมกรวยที่ 30 องศา โดยจัดวางแหวนทรงกรวยชี้ทวน

กระแสการไหลที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า  $D_{R_0} = 0.6$  โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิชช  $P_R = 2$  ที่ค่า  $Re = 3000$  ถึง  $14000$  พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของ  $D_{R_0} = 0.6$  และ  $D_{R_0} = 0.9, 0.95$  และ  $0.97$  อยู่ในช่วง  $0.75 - 1.37$  เมื่อพิจารณาจากกราฟที่ได้พบว่าค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า  $D_{R_0} = 0.6$  และ  $D_{R_0} = 0.9$  ที่  $Re = 3000$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ 1.37



รูปที่ 12 ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับ Re ที่ติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิม



รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนกับ Re สำหรับแหวนทรงกรวยติดตั้งมุม 30 องศาที่  $D_{R_0}$  ต่างๆ

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อทรงกลมที่มีการติดตั้งแหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมโดยอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้า  $D_{R_0} = 0.6$  ที่  $D_{R_0} = 0.9, 0.95$  และ  $0.97$  คมลำดับ เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนระยะพิชช  $P_R = 2$  พบว่าเมื่อใส่แหวนทรงกรวยในท่อกลมจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการไหลและเกิดการกระแทกของกระแสการไหลที่บริเวณผนังท่อ ซึ่งทำให้เกิดการกระจายอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังบริเวณใกล้เคียงผนังท่อส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นแต่อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่แหวนทรงกรวยแบบดั้งเดิมยังทำให้เพิ่มค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมากขึ้นอีกด้วย จึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพต่ำลง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการติดตั้งมุมกรวยที่ 30 องศาเพื่อลดค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานโดยการติดตั้งมุมกรวยที่ 30 องศา จาก

การศึกษาพบว่าเมื่อทำการตัดแปลงมุมกรวยทำให้เพิ่มค่าประสิทธิภาพมากขึ้นโดยที่  $D_{r,i} = 0.6$ ,  $D_{r,o} = 0.9$  ที่  $Re = 3000$  ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดที่ 1.37 และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนเลขนัสเซลพบว่าที่  $D_{r,i} = 0.6$ ,  $D_{r,o} = 0.97$  พิจารณาที่  $Re = 3000$  ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลสูงที่สุด โดยมีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ 3.52 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Patankar, S.V., Liu, C.H. and Sparrow, E.M., Fully developed flow and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of cross-sectional area, *ASME J. Heat Transfer*, (1977) 100–106.
- [2] Muthusamy, C., Vivar, M., Skryabin, I. and Srihar, K., Effect of conical cut-out turbulators with internal fins in a circular tube on heat transfer and friction factor, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 44 (2013) 64–68.
- [3] Yakut, K., Sahin, B., and Canbazoglu, S., Flow induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers, *Applied Energy* 78 (2004) 273–288.
- [4] Promwong, P., Heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts, *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 8–15
- [5] Eiamsa-ard, S., Experimental investigation of heat transfer and turbulent flow friction in a tube fitted with perforated conical-ring 37 (2010) 560–567
- [6] Anvari, A.R., Lotfi, R., Rashidi, A.M., and Sattari, S., Experimental research on heat transfer of water in tubes with conical ring inserts in transient regime, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38 (2011) 668–671.

## ประวัติผู้เขียน

|  |   |
|--|---|
| ชื่อ-สกุล                                  | นางสาว ประกายดาว เงินวัน  |
| วัน เดือน ปีเกิด                           | 28 มกราคม พ.ศ. 2533   |
| ที่อยู่                                    | 109 หมู่ 3 ตำบลผาเลือด อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์<br>รหัสไปรษณีย์ 5319 0  |
| เบอร์โทร                                   | 081-7832883   |
| ประวัติการศึกษา                            | สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.)<br>สาขาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-<br>ญี่ปุ่น  |
| ประสบการณ์การทำงาน<br>ปัจจุบัน             | ตำแหน่ง Production engineering บริษัทพี.กริม.เอ็ม.บี.เอ็ม เมทัลเวิร์คส<br>จำกัด 59 ถนนสุวินทวงศ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ<br>10530  |
| ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์<br>พ.ศ. 2557 | งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28<br>(15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น) ในหัวข้อ การจำลองเชิงตัวเลข<br>ของการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนในท่อกลมที่ใส่แหวนรูปกรวย<br>Conical rings                                    |
| พ.ศ. 2559                                  | งานประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์<br>ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 15 (30-31 มีนาคม 2559 จังหวัด<br>สุราษฎร์ธานี) ในหัวข้อ การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนและ<br>การถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ใส่แหวนทรงกรวยตัด |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้