

การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยปีกบางรูปตัววี

Thermal Performance Enhancement in a Heat exchanger with V-winglets



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยปีกบางรูปตัววี

Thermal Performance Enhancement in
a Heat exchanger with V-winglets



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thermal Performance Enhancement in
a Heat exchanger with V-winglets



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

2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LACKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยปีกบางรูปตัววี

นายกษิตินาถ	สุระนาถ	59010060
นางสาวญาณิศา	กิจวิกรัยอนันต์	59010352
นางสาวปุณขารี	ศรีสงวน	59010871
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2562		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยติดตั้งปีกบางรูปตัววีในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการให้ความร้อนที่ผนังท่อ แบบพลักซ์ความร้อนคงที่ โดยการศึกษาจะให้ความสนใจในตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลกับค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน ในการทดลองได้ติดตั้งปีกบางรูปตัววี 2 แบบ คือ วางในแนวเส้นทแยงมุมและวางติดผิวท่อ แผ่นปีกรูปตัววีที่ใช้จะมีรูปร่างแบบสี่เหลี่ยมคางหมู, สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยมผืนผ้า, และสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว โดยมีอัตราส่วนบล็อก 3 ค่า ($BR = 0.15, 0.2, 0.25$) และอัตราส่วนพิตช์ 2 ค่า ($PR = 0.5, 1.0$) ที่ 2 ค่ามุมปะทะ ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ$) ซึ่งมีการวางตัว 2 แบบคือ ปลายวีชี้ตามทิศทางการไหลของของไหล (V-downstream) และแบบสวนทางกับทิศทางการไหลของของไหล (V-upstream) โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบซึ่งไหลผ่านท่อ โดยแสดงในรูปของเลขเรย์โนลด์ส ในช่วง 4,000 ถึง 26,000 และเพื่อเข้าถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันจะถูกพิจารณาในรูปแบบของเลขนัสเซลต์และตัวประกอบเสียดทาน โดยตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งสัมพันธ์กับเลขนัสเซลต์และตัวประกอบเสียดทาน ซึ่งเปรียบเสมือนกำลังของการปั๊ม ได้ถูกนำเสนอเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบระบบความร้อน โดยแบบจำลองเชิงตัวเลขของการไหลถูกใช้ในการศึกษาวิธีการหรือกลไกของการแลกเปลี่ยนความร้อน และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง รวมถึงใช้ในการการพัฒนาและปรับปรุงปีกรูปตัววี

ผลการทดลองพบว่าแผ่นปีกบางรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัวที่ถูกติดตั้งแบบวางติดผิวท่อ กรณีการไหลแบบสวนทางกับทิศทางการไหลของของไหล (V-upstream) ที่อัตราส่วนบล็อก ($BR = 0.15$) อัตราส่วนพิตช์ ($PR = 1.0$) และมุมปะทะ ($\alpha = 30^\circ$) ให้เลขนัสเซลต์และตัวประกอบเสียดทานที่สูงกว่าท่อผิวเรียบประมาณ 2.4 ถึง 3.3 เท่า และ 8.4 ถึง 12.8 เท่า ตามลำดับ โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการทำงาน และให้ผลของค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดที่เลขเรย์โนลด์สต่ำสุด มีค่าประมาณ 1.765 ในการทดลอง และ 2.034 ในการจำลอง ซึ่งเป็นผลจากความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานในการทดลอง ด้วยเหตุนี้ จึงนำกรณีนี้มาเจาะช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่พื้นผิวของแผ่นปีก โดยศึกษาจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ซึ่งขนาดช่องเจาะ W/L เท่ากับ 0.4 และ V/H เท่ากับ 0.45

ให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 2.075

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thermal Performance Enhancement in a Heat exchanger with V-winglets

Kasitinad Suranad 59010060
Yanisa Kitvikraianan 59010352
Puntaree Srisanguan 59010871
Assoc.Prof Dr.Pongjet Promvonge Advisor
Year 2019

ABSTRACT

This research presents an experimental study on thermal performance enhancement in a heat exchanger square-duct with a constant heat-fluxed wall by inserting the V-winglets. The study was focused on various variables that influence on the thermal enhancement factor (TEF). In the present experiment, the V-winglets were inserted diagonally and placed on the duct surface and the V-winglet shapes were trapezoidal, triangular, rectangular, and discrete rectangular. The winglet characteristics were three blockage ratios ($BR = 0.15, 0.2, 0.25$) and two pitch ratios ($PR = 0.5, 1$) at two angles of attack ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ$) with V-tip pointing downstream and upstream arrangements. Air was used as the test fluid that entered the duct for Reynolds number between 4,000 and 26,000. The heat transfer and friction loss are considered in the form of Nusselt number and friction factor while to access the real merits of the heat exchanger, thermal enhancement factor which relates Nusselt number and friction factor as the same pumping power is offered to judge the thermal system. A numerical model of flow was used to explore the mechanism of heat transfer and compare with the experimental results, including to development and improvement of V-winglets.

The experimental results have revealed that the V-upstream discrete-rectangular winglets with $BR = 0.15$, $PR = 1.0$ and $\alpha = 30^\circ$ placing close to the duct surface provided higher Nusselt number and friction factor than the smooth duct around 2.4 to 3.3 times and 8.4 to 12.8 times, respectively, depending upon operating conditions and yielded the highest TEF at the lowest Reynolds number around 1.765 in experiment and 2.034 in simulation due to imperfections of the experimental model. For this reason, that case was further improved by drilling a rectangular hole on the winglet surface with a hole size of $W/L = 0.4$ and $V/H = 0.45$. By considering the numerical results, it is found that TEF can be increased by 2.075.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยปีกบางรูปตัววีฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์จาก รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณคณาจารย์และรุ่นพี่ที่ห้องปฏิบัติการ Thermo-Fluid & CFD ทุกคน ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการศึกษาวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวและเพื่อนนักศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ ผลักดัน และเป็นกำลังใจตลอดมา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวถึง จึงขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้

นายกษิตินาถ สุระนาถ
นางสาวญาณิศา กิจวิกรัยอนันต์
นางสาวปณทรี ศรีสงวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
ความหมายของคำย่อและสัญลักษณ์.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการไหล.....	5
2.2.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน.....	5
2.2.2.1 เลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number).....	6
2.2.3 การไหลช่องทางเข้า.....	7
2.2.4 ความเร็วเฉลี่ยและอุณหภูมิ.....	10
2.2.5 การสูญเสียความดันและค่าตัวประกอบเสียดทาน.....	11
2.2.6 พื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน.....	13
2.2.6.1 กลไกการถ่ายเทความร้อน.....	13
2.2.6.2 การพาความร้อน.....	13
2.2.7 เลขนัสเซิลต์ (Nusselt number).....	15
2.2.8 การวิเคราะห์ความร้อนทั่วไป.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.9 ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน	16
2.2.10 สมมุติฐานของการไหลและสมการควบคุม	17
2.2.11 การคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง	18
2.2.11.1 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว	18
2.2.11.2 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน	19
2.2.12 การวิเคราะห์บริเวณใกล้เคียงสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็น ขอบเขต	20
2.2.13 การจำลองการไหลใกล้เคียงด้วยวิธี enhanced wall treatment	22
2.2.14 แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k - \epsilon$	24
2.2.15 พลังงานจลน์ปั่นป่วน	25
2.2.16 วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมกับการพาและแพร่แบบคงตัว	25
2.2.16.1 วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK	25
2.2.17 ลำดับขั้นการคำนวณหาคำตอบแบบ SIMPLE	26
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง	29
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข	34
บทที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์และวิธีการทดลอง	37
3.1 บทนำ	37
3.2 การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลอง	37
3.2.1 ท่อทางเข้าชุดทดลอง	37
3.2.2 เครื่องปั๊มลม	38
3.3 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง	39
3.3.1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส	39
3.3.2 Supply Air	39
3.3.3 ถังพักลม (Settling tank)	41
3.3.4 อุปกรณ์ควบคุมฟลักซ์ความร้อนของแผ่นฮีตเตอร์	41
3.3.5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ	42
3.3.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.7 อุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม (Differential pressure gages).....	44
3.3.8 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ	44
3.4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง.....	45
3.4.1 อุปกรณ์ชุดทดลอง	45
3.4.2 อุปกรณ์ติดตั้งในชุดทดลอง	46
3.5 วิธีการทดลอง.....	47
3.6 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	48
3.7 การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์	48
3.8 การตรวจสอบความละเอียดของกริดเซลล์บริเวณใกล้ผนังท่อ	49
3.9 การตรวจสอบแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองการไหลในท่อเรียบ.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	52
4.1 บทนำ.....	52
4.2 การทดสอบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ	52
4.2.1 ตัวประกอบเสียดทาน (friction factor).....	52
4.2.2 เลขนัสเซิลต์ (Nusselt number).....	53
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่แตกต่างกันของแผ่นปีกรูปตัววี.....	54
4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของวิธีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววี.....	58
4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี.....	62
4.5.1 กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีตามแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบ.....	62
4.5.2 กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีชิดพื้นผิวท่อทดสอบ	66
4.6 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพิทช์ของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี	70
4.7 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี.....	76
4.7.1 กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream).....	76
4.7.2 กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream).....	82
4.8 ผลการศึกษาอิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหลที่มีผลต่อแผ่นปีกรูปตัววี	88
4.9 ผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของปีกรูปตัววี..	95
4.9.1 กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream).....	95
4.9.2 กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream).....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน	105
4.11 การพัฒนาและปรับปรุงแผ่นปีกรูปตัววีในรูปแบบต่าง ๆ	109
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	117
5.1 สรุปผลการทดลอง	117
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	117
บรรณานุกรม	119
ภาคผนวก	121



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ.....	123



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงการพัฒนาชั้นขีดความเร็วผิวของการไหลภายในท่อ	7
2.2 การเปลี่ยนแปลงขอบเขตของชั้นความเร็วบนแผ่นเรียบสำหรับการไหลที่แตกต่างกัน	8
2.3 แสดงการพัฒนาชั้นขีดผิวความร้อนภายในท่อ (ของไหลเป็นของไหลร้อน).....	9
2.4 แสดงการพัฒนาชั้นขีดผิวความร้อนภายในท่อ (ของไหลเป็นของไหลเย็น)	10
2.5 แผนภาพของ Moody.....	12
2.6 การพาความร้อนแบบบังคับและการพาความร้อนแบบธรรมชาติ	14
2.7 แสดงรูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง	19
2.8 การแบ่งของชั้นขีดผิว	21
2.9 ลักษณะของกริดบริเวณใกล้ผนังใน ANSYS FLUENT	21
2.10 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ	26
2.11 ลำดับขั้นตอนการคำนวณวิธี SIMPLE	28
2.12 ครีบบางตัววีของ จิตรกร กนกนัยการ (2553)	30
2.13 แผ่นทดสอบของ สมพล สุกุลหลง (2551).....	31
2.14 การจัดวางครีบบางตัววีตรงกันและเยื้องกันของ Promvong and Thianpong (2008).....	33
2.15 แสดงท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีแผ่นกั้นการไหลในรูปแบบต่าง ๆ.....	35
2.16 แสดงรูปทรงของท่อรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีแผ่นกั้นการไหลรูปตัววี.....	36
2.17 ลักษณะรูปแบบการไหลของ Sripattanapipat et al. (2016)	36
3.1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส	39
3.2 พัดลมหอยโข่งแรงดันสูง (Blower รุ่น TB-150).....	39
3.3 มอเตอร์ไฟฟ้า (Motor)	40
3.4 อินเวอร์เตอร์ (Inverter รุ่น ND1-4-5A5).....	40
3.5 ถังพักลม (Settling tank).....	41
3.6 เครื่องควบคุมฟลักซ์ความร้อนของแผ่นฮีตเตอร์.....	41
3.7 Orifice meter.....	42
3.8 เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer).....	42
3.9 Data Logger SUPCON	43
3.10 Data acquisition system รุ่น Fluke 2650A.....	43
3.11 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor).....	44
3.12 เครื่องวัดความดันตกรวม (Differential pressure gages).....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.13 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (Vane-type Anemometer) รุ่น TESTO 445.....	45
3.14 แผนผังของชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส	45
3.15 ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	47
3.16 รูปร่างกริดเซลล์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี.....	48
3.17 อิทธิพลของจำนวนกริดเซลล์ต่อค่า Nu และ f ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,150$	49
3.18 ความละเอียดของกริดเซลล์.....	50
3.19 การตรวจสอบความถูกต้องของตรงผิวเรียบสำหรับ (ก) การถ่ายเทความร้อน และ (ข) สัมประสิทธิ์ตัวประกอบเสียดทาน.....	51
4.1 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทาน และเลขเรย์โนลด์ส กรณีท่อผิวเรียบ	53
4.2 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลต์ และเลขเรย์โนลด์ส กรณีท่อผิวเรียบ	54
4.3 อิทธิพลของมุมปะทะต่อตัวประกอบเสียดทาน	55
4.4 อิทธิพลของมุมปะทะต่ออัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทาน	55
4.5 อิทธิพลของมุมปะทะต่อเลขนัสเซลต์	56
4.6 อิทธิพลของมุมปะทะต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลต์	57
4.7 อิทธิพลของมุมปะทะต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน.....	58
4.8 อิทธิพลของวิธีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบเสียดทาน.....	59
4.9 อิทธิพลของวิธีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนของประกอบเสียดทาน	59
4.10 อิทธิพลของวิธีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีต่อเลขนัสเซลต์	60
4.11 อิทธิพลของวิธีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลต์.....	61
4.12 อิทธิพลของวิธีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน	62
4.13 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งในแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบต่อ ตัวประกอบเสียดทาน.....	63
4.14 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งในแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบต่อ อัตราส่วนของประกอบเสียดทาน	63
4.15 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งในแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบต่อ เลขนัสเซลต์.....	64
4.16 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งในแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบต่ออัตราส่วน ของเลขนัสเซลต์	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.17 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งในแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน	66
4.18 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบต่อตัวประกอบเสียดทาน	67
4.19 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบต่ออัตราส่วนตัวของประกอบเสียดทาน	67
4.20 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบต่อเลขนัสเซลล์ต์	68
4.21 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลล์ต์	69
4.22 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน	70
4.23 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ของแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบเสียดทาน	71
4.24 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ของแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนตัวของประกอบเสียดทาน	71
4.25 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ของแผ่นปีกรูปตัววีต่อเลขนัสเซลล์ต์	72
4.26 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ของแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลล์ต์	73
4.27 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ของแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน	74
4.28 คอนทิวรัลของเลขนัสเซลล์ต์ (ก) $PR = 0.5$ และ (ข) $PR = 1.0$	75
4.29 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล (ก) $PR = 0.5$, (ข) บริเวณหัวของปีกรูปตัววี $PR = 1.0$ และ (ค) บริเวณปลายของปีกรูปตัววี $PR = 1.0$	75
4.30 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบทิศทางการไหล (ก) $PR = 0.5$ และ (ข) $PR = 1.0$	75
4.31 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบเสียดทาน กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)	76
4.32 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนตัวของประกอบเสียดทาน กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)	77
4.33 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่อเลขนัสเซลล์ต์ กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)	78
4.34 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลล์ต์ กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.35 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีการไหลแบบปลายวีขึ้นสวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)	80
4.36 คอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ กรณีการไหลแบบปลายวีขึ้นสวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)	81
4.37 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีขึ้นสวนทางกับ กระแสการไหล (V-upstream) (ก)BR = 0.15 , (ข)BR = 0.2 และ (ค)BR = 0.25	81
4.38 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีขึ้นสวนทางกับกระแส การไหล (V-upstream) (ก)BR = 0.15 , (ข)BR = 0.2 และ (ค)BR = 0.25	81
4.39 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบเสียดทาน กรณีการไหลแบบ ปลายวีขึ้นตามกับกระแสการไหล (V-downstream).....	82
4.40 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนตัวของประกอบเสียดทาน กรณีการ ไหลแบบปลายวีขึ้นตามกับกระแสการไหล (V-downstream)	83
4.41 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่อเลขนัสเซลล์ กรณีการไหลแบบปลายวีขึ้น ตามกับกระแสการไหล (V-downstream)	84
4.42 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลล์ กรณีการไหล แบบปลายวีขึ้นตามกับกระแสการไหล (V-downstream).....	85
4.43 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีการไหลแบบปลายวีขึ้นตามกับกระแสการไหล (V-downstream)	86
4.44 คอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ กรณีการไหลแบบปลายวีขึ้นตามกับกระแสการไหล (V-downstream) (ก)BR = 0.15 , (ข)BR = 0.2 และ (ค)BR = 0.25	87
4.45 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีขึ้นตามกับกระแส การไหล (V-downstream) (ก)BR = 0.15 , (ข)BR = 0.2 และ (ค)BR = 0.25	87
4.46 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีขึ้นตามกับกระแสการไหล (V-downstream) (ก)BR = 0.15 , (ข)BR = 0.2 และ (ค)BR = 0.25	87
4.47 อิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหลต่อตัวประกอบเสียดทาน	88
4.48 อิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหลต่ออัตราส่วนตัวของประกอบเสียดทาน.....	89
4.49 อิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหลต่อเลขนัสเซลล์	90
4.50 อิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหลต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลล์.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.51 อิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหลต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน	92
4.52 เส้นความเร็วของกระแสการไหลบนระนาบขวางทิศทางการไหล (ก) V-upstream และ (ข) V-downstream	93
4.53 คอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ต์ (ก) V-upstream และ (ข) V-downstream.....	93
4.54 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล (ก) V-upstream และ (ข) V-downstream	94
4.55 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบทิศทางการไหล (ก) V-upstream และ (ข) V-downstream	94
4.56 แสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานระหว่างผลจากแบบจำลองปั่นป่วน $k - \epsilon$ และผลการทดลอง กรณีการไหลแบบปลายวิชีส์สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)	96
4.57 แสดงการเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ต์ระหว่างผลจากแบบจำลองปั่นป่วน $k - \epsilon$ และผลการทดลอง กรณีการไหลแบบปลายวิชีส์สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)	97
4.58 แสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนระหว่างผลจากแบบจำลอง ปั่นป่วน $k - \epsilon$ และผลการทดลอง กรณีการไหลแบบปลายวิชีส์สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)	98
4.59 คอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ต์ กรณีการไหลแบบปลายวิชีส์สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) (ก) ไม่มีช่องว่าง และ (ข) มีช่องว่าง 1.5 mm.....	99
4.60 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวิชีส์สวนทางกับกระแส การไหล (V-upstream) (ก) ไม่มีช่องว่าง และ (ข) มีช่องว่าง 1.5 mm.....	99
4.61 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวิชีส์สวนทางกับกระแส การไหล (V-upstream) (ก) ไม่มีช่องว่าง และ (ข) มีช่องว่าง 1.5 mm.....	100
4.62 แสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานระหว่างผลจากแบบจำลองปั่นป่วน $k - \epsilon$ และผลการทดลอง กรณีการไหลแบบปลายวิชีส์ตามกับกระแสการไหล (V-downstream) ..	101
4.63 แสดงการเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ต์ระหว่างผลจากแบบจำลองปั่นป่วน $k - \epsilon$ และผลการทดลอง กรณีการไหลแบบปลายวิชีส์ตามกับกระแสการไหล (V-downstream) ..	102
4.64 แสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนระหว่างผลจากแบบจำลอง ปั่นป่วน $k - \epsilon$ และผลการทดลอง กรณีการไหลแบบปลายวิชีส์ตามกับกระแสการไหล (V-downstream).....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.65 คอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) (ก) ไม่มีช่องว่าง และ (ข) มีช่องว่าง 1.5 mm	104
4.66 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) (ก) ไม่มีช่องว่าง และ (ข) มีช่องว่าง 1.5 mm	104
4.67 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) (ก) ไม่มีช่องว่าง และ (ข) มีช่องว่าง 1.5 mm	105
4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และอัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทาน	106
4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และอัตราส่วนของเลขนัสเซลล์	107
4.71 ภาพด้านหน้าของแผ่นปีกรูปตัววีเมื่อการเจาะช่องสี่เหลี่ยม	109
4.72 ความสัมพันธ์ระหว่าง W/L และอัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทานที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่าง ๆ เมื่อ $V/H = 0.25$	110
4.73 ความสัมพันธ์ระหว่าง W/L และอัตราส่วนของเลขนัสเซลล์ที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่าง ๆ เมื่อ $V/H = 0.25$	110
4.74 ความสัมพันธ์ระหว่าง W/L และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนที่เลขเรย์โนลด์ส์ ต่าง ๆ เมื่อ $V/H = 0.25$	111
4.75 ความสัมพันธ์ระหว่าง V/H และอัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทานที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่าง ๆ เมื่อ $W/L = 0.4$	111
4.76 ความสัมพันธ์ระหว่าง V/H และอัตราส่วนของเลขนัสเซลล์ที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่าง ๆ เมื่อ $W/L = 0.4$	112
4.77 ความสัมพันธ์ระหว่าง V/H และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนที่เลขเรย์โนลด์ส์ ต่าง ๆ เมื่อ $W/L = 0.4$	112
4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และอัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทานจากแบบจำลอง ปั่นป่วน $k - \epsilon$	113
4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และอัตราส่วนของเลขนัสเซลล์จากแบบจำลองปั่นป่วน $k - \epsilon$	114
4.80 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนจาก แบบจำลองปั่นป่วน $k - \epsilon$	115
4.81 เส้นความเร็วของกระแสการไหลบนระนาบขวางทิศทางการไหล (ก) ไม่มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม และ (ข) มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.82 คอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ต์ (ก) ไม่มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม และ (ข) มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม..	116
4.83 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล (ก) ไม่มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม และ (ข) มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม.....	116
ข-1 Standard orifice plate.....	125
ข-2 โครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิส	125
ข-3 การไหลผ่านแผ่นออริฟิส (Orifice).....	126
ข-4 ออริฟิสแบบต่าง ๆ	126



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายของคำย่อและสัญลักษณ์

a	ความกว้างของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส, m
A_c	พื้นที่หน้าตัด, m^2
BR	อัตราส่วนบล็อก (Blockage ratio, BR)
c_p	ความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่ (Specific heat capacity, c_p), $J / kg \cdot K$
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter, D_h), m
f	ตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor, f)
f_0	ตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ
f_{Darcy}	ตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor) ของ Moody หรือ Darcy
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient, h)
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conduction heat transfer coefficient, k)
L	ความยาวของท่อที่วัดความดันตกคร่อม, m
L_c	ความยาวเฉพาะ (Characteristic length), m
L_h	ความยาวของการปรับตัวของความเร็วบริเวณทางเข้า (Hydrodynamic entry length), m
$L_{h,laminar}$	ความยาวของการปรับตัวของความเร็วบริเวณทางเข้าของการไหลแบบราบเรียบ (Hydrodynamic entry length of laminar flow), m
$L_{h,turbulent}$	ความยาวของการปรับตัวของความเร็วบริเวณทางเข้าของการไหลแบบปั่นป่วน (Hydrodynamic entry length of turbulent flow), m
L_t	ความยาวของการปรับตัวของความร้อนบริเวณทางเข้า (Thermal entry length), m
$L_{t,laminar}$	ความยาวของการปรับตัวของความร้อนบริเวณทางเข้าของการไหลแบบราบเรียบ (Thermal entry length of laminar), m
$L_{t,turbulent}$	ความยาวของการปรับตัวของความร้อนบริเวณทางเข้าของการไหลแบบปั่นป่วน (Thermal entry length of turbulent), m
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล, kg / s
Nu	เลขนัสเซิลต์ (Nusselt number, Nu)
Nu₀	เลขนัสเซิลต์ของท่อผิวเรียบ
p	เส้นรอบรูปของหน้าตัดท่อ, m
Pr	เลขพรันด์เทิล (Prandtl number)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายของคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

PR	อัตราส่วนพิตช์ (Pitch ratio, PR)
P_1	ความดันที่จุด 1, N / m^2
P_2	ความดันที่จุด 2, N / m^2
Re	เลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number, Re)
Re_{cr}	เลขเรย์โนลด์ส์วิกฤต (Critical Reynolds Number)
T_b	อุณหภูมิของของไหล หรือ อุณหภูมิเฉลี่ยบัค (Bulk mean temperature), $^{\circ}C$
T_e	อุณหภูมิบริเวณทางออกของของไหล, $^{\circ}C$
T_i	อุณหภูมิบริเวณทางเข้าของของไหล, $^{\circ}C$
$T_{m,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยขาเข้า, $^{\circ}C$
$T_{m,e}$	อุณหภูมิเฉลี่ยขาออก, $^{\circ}C$
T_s	อุณหภูมิพื้นผิว, $^{\circ}C$
TEF	ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal enhancement factor, TEF)
V_{avg}	ค่าความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m / s
α	มุมปะทะ (Angle of attack, α), $^{\circ}$
v	ความหนืดของของไหล, m^2 / s
ρ	ความหนาแน่นของสสาร, kg / m^3
μ	ความหนืดพลวัต หรือ ความหนืดไดนามิกส์, N / m^2
\dot{V}	อัตราการไหลเชิงปริมาตร, m^3 / s
ΔP_L	การสูญเสียความดัน (Pressure loss), N / m^2
\dot{W}	กำลังของปั๊มหรือพัดลม, J / s
\dot{Q}_{conv}	อัตราการพาความร้อน, J / s
\dot{q}	ค่าฟลักซ์ความร้อน, $J / s \cdot m^2$
η	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานความร้อน การใช้พลังงานความร้อนในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เช่น เครื่องกลั่น เครื่องควบแน่น แผงระบายความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องทำความเย็น เครื่องอบแห้ง เตาเผา และเครื่องยนต์ เป็นต้น การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพและเหมาะสม ทำให้ลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และลดการใช้พลังงานเพื่อเพิ่มผลประโยชน์ในทางเศรษฐศาสตร์และลดปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อม เช่น ภาวะโลกร้อนและมลภาวะในอากาศที่ถูกกล่าวถึงเป็นอย่างมาก สวนทางกับความต้องการในการใช้พลังงานที่ยังคงเพิ่มมากขึ้น

การเพิ่มสมรรถนะความร้อนได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เป็นแบบ Active Technique เป็นการนำเอาแหล่งพลังงานภายนอกเข้ามาช่วย เช่น อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการสั่นของผิวทำให้ของไหลเกิดการสั่นสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น และกลุ่มที่ 2 เป็นแบบ Passive Technique เป็นการออกแบบลักษณะพื้นผิวของท่อแบบพิเศษ ต่างไปจากผิวเรียบและปรับปรุงของไหลหรือสารทำงานเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยไม่มีพลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ติดตั้งแผ่นกั้น (baffle), ครีบรูปทรงต่าง ๆ (ribs) และใช้ปีกเล็ก (winglet) เป็นต้น วิธีที่เป็นที่นิยมคือแบบ Passive Technique โดยวิธีที่ได้ผลดีที่สุดอย่างหนึ่ง คือ การใช้แผ่นปีกรูปตัววีเป็นตัวสร้างความปั่นป่วน ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มมากขึ้น แต่ในทางกลับกันจะทำให้เกิดการสูญเสียความดันมากขึ้นด้วย ซึ่งจะเกี่ยวเนื่องกับการสูญเสียพลังงานที่เพิ่มมากขึ้น เพราะฉะนั้นจึงต้องเลือกใช้แผ่นปีกรูปตัววีภายในท่อให้มีความเหมาะสม โดยพิจารณา มุมปะทะ รูปทรง อัตราส่วนบล็อก อัตราส่วนพิทช์ วิธีการติดตั้ง และทิศทางการวางปีกรูปตัววี

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลที่มีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววี โดยที่ผนังท่อกมีความร้อนแบบฟังก์ชันความร้อนคงที่ ทั้งในส่วนของการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS (FLUENT) 19

2. เพื่อศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งได้มีการศึกษามาแล้วในอดีต ทั้งในส่วนของการทดลอง

และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดันและค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนด้วยการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีปีกรูปตัววี ซึ่งประกอบด้วยอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ รูปทรง ทิศทางการวางปีกรูปตัววี วิธีการติดตั้งปีกรูปตัววี มุมปะทะ อัตราส่วนบล็อก และอัตราส่วนพิตช์

4. ศึกษาและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

5. พัฒนาและปรับปรุงแผ่นปีกรูปตัววีด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เพื่อนำไปสู่ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงขึ้น

1.3 สมมติฐานการศึกษา

1. ทราบถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดันและค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน รวมถึงทราบค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าสูงสุด

2. สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการไหล และการถ่ายเทความร้อนจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการทดลองในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววี

3. พัฒนาและปรับปรุงแผ่นปีกรูปตัววีให้มีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกับวงกลมโดยกำหนดความกว้างหรือความสูงที่เท่ากัน ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่า ทำให้อัตราการไหลมีค่ามากกว่าท่อหน้าตัดวงกลม อีกทั้งสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและเหมาะสำหรับการติดตั้งระบบที่ต้องการให้พื้นผิวท่อเรียบไปกับผนังหรือมีข้อจำกัดในการติดตั้ง แต่เนื่องจากท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะมีมุมเหลี่ยมที่ทำให้เกิดการกระจายลมที่ไม่ทั่วถึงบนหน้าตัด รวมถึงมีมลพิษทางเสียง ทำให้ท่อหน้าตัดวงกลมเป็นที่นิยมมากกว่า

การถ่ายเทความร้อนภายในท่อด้วยของไหลที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจะทำให้เกิดประสิทธิภาพมากกว่าการถ่ายเทความร้อนด้วยของไหลที่มีการไหลแบบราบเรียบ เนื่องจากการไหลแบบราบเรียบจะทำให้ของไหลมีพฤติกรรมการกระจายความเร็วบนพื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอและมีช่วงปรับตัวที่ทางเข้ามากกว่าการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้เลขนัสเซลล์ของการไหลแบบปั่นป่วนมีค่ามากกว่าการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อจะเกิดขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์มีค่ามากกว่า 4,000

จากผลการวิจัยในอดีตลักษณะของปีกรูปตัววีที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพจะมีมุมปะทะเท่ากับ 30° , อัตราส่วนพิตช์เท่ากับ 1 และอัตราส่วนบล็อกเท่ากับ 0.15 เมื่อการวางตัวของแผ่นปีกรูปตัววีเป็นลักษณะสวนทางกับกระแสการไหล

นอกจากนี้แล้วยังต้องคำนึงถึงขีดความจำกัดในการทดลองของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง, ค่าตัวแปรที่ใช้ศึกษาซึ่งต้องคำนึงถึงหลายส่วน รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษา ดังนั้นจึงนำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาช่วยวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าว โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อแตกต่างหรือความคลาดเคลื่อนนั้น ๆ รวมถึงใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อการพัฒนาและปรับปรุงปิกูรูปตัววีกด้วย

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบในการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข
2. ศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ระหว่าง 4,000 ถึง 26,000 เป็นการไหลแบบคงตัวและไม่อัดตัว
3. ในการทดลองมีการให้ความร้อนที่ผิวท่อแบบปลั๊กความร้อนคงที่ $800-1400 \text{ W/m}^2$ และ 600 W/m^2 สำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข
4. ปีกบางรูปตัววีกติดตั้งบนแผ่นบางซึ่งจัดวางแบบทแยงมุม และติดตั้งแบบวางบนผิวของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดหน้าตัด 45×45 ตารางมิลลิเมตร ทำมุมปะทะกับทิศทางการไหลเท่ากับ 30 และ 45 องศา มีการศึกษาทั้งการไหลแบบปลายวีกขึ้นส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) และตามกระแสการไหล (V-downstream) โดยมีลักษณะการจัดวางปิกูรูปตัววีกแบบตรงกัน (in-line)
5. ลักษณะรูปร่างของแผ่นปิกูรูปตัววีกเป็นแบบสี่เหลี่ยมคางหมู สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมผืนผ้า หัวเต็ม และสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว โดยมีอัตราส่วนพิช เท่ากับ 0.5, 1.0 และอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2 และ 0.25
6. ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในแบบจำลองการไหล 3 มิติ ที่มีการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรสี่บเนื่อง (Finite volume method)
7. ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k-\epsilon$
8. การคู่ควบของความเร็วและความดันใช้กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE
9. เทอมของการพาความร้อนใช้แผนการคำนวณแบบ QUICK
10. พิจารณาเฉพาะความร้อนแบบบังคับ (Force convection)
11. ศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมในรูปของพารามิเตอร์ไร้นหน่วย คือ เลขนัสเซลต์ และตัวประกอบเสียดทาน ตามลำดับ

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. รวบรวมข้อมูล ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของไหล การถ่ายเทความร้อนภายในท่อ และการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลผ่านครีบริบบแบบต่าง ๆ
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำหนดลักษณะของปัญหาและรูปร่างของปีกรูปตัววี แล้วจึงสร้างแผ่นปีกรูปตัววีสำหรับการทดลอง
3. ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีแผ่นปีกรูปตัววี โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามที่ระบุไว้ในจุดประสงค์ ได้แก่ มุมปะทะ รูปทรง วิธีการติดตั้งปีกรูปตัววี อัตราส่วนบล็อก และอัตราส่วนพิทช์ โดยอ้างอิงรูปแบบพื้นฐานจากงานวิจัยในอดีต
4. กำหนดลักษณะของครีบบและสร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหล พร้อมกับเลือกขนาดและจำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสม
5. ตรวจสอบแบบจำลองความปั่นป่วนและดำเนินการคำนวณเชิงตัวเลขจากการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติ
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ซึ่งแสดงในรูปของพารามิเตอร์ไร้หน่วย ได้แก่ เลขนัสเซิลต์ ตัวประกอบเสียดทาน และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน
7. สรุปผลการวิจัยและให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับทำการวิจัยต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีภายในท่อสี่เหลี่ยมเพื่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้ทราบถึงการศึกษาระบบการพัฒนาของการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนให้แก่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ผ่านมา เพื่อนำไปสู่การพัฒนา ปรับปรุงและหาแนวทางแก้ไขเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของงานวิจัยนี้ต่อไป

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการไหล

ของไหล คือ สสารที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างต่อเนื่อง เมื่อมีความเค้นเฉือนมากระทำจะทำให้สสารเกิดการเคลื่อนที่และเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ของเหลวและก๊าซจัดว่าเป็นรูปแบบของของไหลชนิดหนึ่ง แต่ก๊าซเป็นของไหลที่อัดตัวได้ที่มีความหนาแน่นไม่คงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ตัวแปร ส่วนของเหลวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้หรือสามารถอัดตัวได้ภายใต้ความดันสูง

การไหลภายในท่อส่วนมากมักพบว่าท่อที่ใช้เป็นท่อที่มีหน้าตัดกลมหรือเป็นท่อทรงกระบอกแต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเปลี่ยนของของไหลในท่อหรือลักษณะการทำงานของระบบ อาจจะมีการปรับเปลี่ยนลักษณะหน้าตัดของท่อได้ ตัวอย่างเช่น การไหลในท่อกลมจะสามารถรองรับแรงดันได้มากกว่าการไหลในท่อเหลี่ยม เนื่องจากสามารถรองรับแรงดันในขนาดเท่ากันตามแนวรัศมีได้ทุกทิศทาง ดังนั้นของไหลที่ใช้กับท่อกลมจึงมักเป็นของเหลวและของไหลที่ใช้ในท่อเหลี่ยมมักอยู่ในรูปของแก๊ส ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมต่าง ๆ จะสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและเหมาะสำหรับการติดตั้งระบบที่ต้องการให้พื้นผิวท่อเรียบไปกับผนังหรือมีข้อจำกัดในการติดตั้ง แต่ท่อเหลี่ยมจะมีมุมทำให้การกระจายลมไม่ทั่วถึง ทำให้เกิดการสูญเสียความดันและมีเสียงดังมากกว่าท่อกลม

2.2.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนพิจารณาจากความเร็วของของไหล ที่ความเร็วต่ำจะทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบราบเรียบ ถ้าค่าความเร็วสูงจะทำให้ของไหลเกิดการไหลแบบปั่นป่วน หรือพิจารณาจากความหนืดภายในท่อ ถ้าของไหลมีความหนืดสูง มักจะเกิดการไหลแบบราบเรียบเพราะแรงต้านความเร็วในการไหลมาก การไหลจะมีทิศทางที่แน่นอน ในทางกลับกันถ้าของไหลมีความหนืดต่ำ จะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเพราะแรงต้านความเร็วในการไหลน้อย จะมี

การไหลในลักษณะที่ไม่แน่นอน นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาจากอัตราการไหลเชิงมวลได้ ยิ่งท่อที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกน้อย ๆ จะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนได้เร็วขึ้น โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1 ภายใต้เงื่อนไขการไหลในท่อ สำหรับการไหลแบบราบเรียบจะเกิดที่ $Re < 2,300$ และการไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดที่ $Re > 4,000$

2.2.2.1 เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number)

การเปลี่ยนแปลงของไหลจากราบเรียบเป็นปั่นป่วนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น รูปร่าง ความขรุขระของพื้นผิว ความเร็วของการไหล อุณหภูมิของพื้นผิวและชนิดของของไหล เลขเรย์โนลด์สเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเนื่องจากความเฉื่อยและแรงเนื่องจากความหนืด การคำนวณหาเลขเรย์โนลด์สสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Re = \frac{V_{avg} D_h}{\nu} = \frac{\rho V_{avg} D_h}{\mu} \quad (2.1)$$

เมื่อ Re คือ ตัวแปรไร้มิติที่บ่งชี้ชนิดของไหลว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ หรือเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

V_{avg} คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยของของไหล

ρ คือ ความหนาแน่นของสารนั้น ๆ

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

μ คือ ความหนืดพลวัต หรือ ความหนืดไดนามิกส์ (Dynamic viscosity)

ν คือ ความหนืดของของไหล (Kinematic viscosity) หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.2)$$

เนื่องจากการประยุกต์ทางวิศวกรรมส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนในท่อที่ไม่เป็นหน้าตัดวงกลม ดังนั้นจึงมีการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลเป็นความยาวเฉพาะ ซึ่งเรียกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$D_h = \frac{4A_c}{p} \quad (2.3)$$

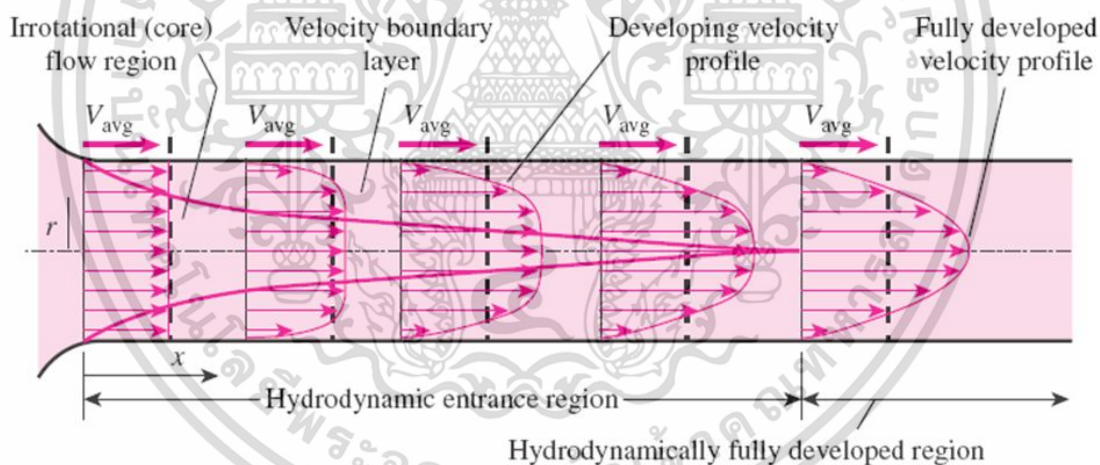
เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัด

p คือ เส้นรอบรูปของหน้าตัดท่อ

เลขเรย์โนลด์ส์ที่มีค่ามากแสดงให้เห็นว่าแรงเฉื่อยซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นและค่าความเร็วของของไหลจะมีค่ามาก เมื่อเทียบกับแรงเนื่องจากความหนืด จัดว่าการไหลนั้นเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนเลขเรย์โนลด์ส์ที่มีค่าน้อยแสดงว่าค่าความหนืดมีมากเมื่อเทียบกับแรงเฉื่อย จัดว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ จุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการไหลราบเรียบเป็นการไหลปั่นป่วนเราสามารถวิเคราะห์ได้จากเลขเรย์โนลด์ส์วิกฤต เลขเรย์โนลด์ส์วิกฤตจะมีค่าแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับรูปร่างที่ของไหลไหลผ่าน และลักษณะการไหลซึ่งแบ่งออกเป็นการไหลภายนอกและการไหลภายใน การไหลจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงจากราบเรียบเป็นปั่นป่วนได้ในทันทีแต่จะมีช่วงที่เกิดการปรับตัวของการไหล เรียกว่า ช่วงการไหลปรับตัว (Transition)

2.2.3 การไหลช่วงทางเข้า

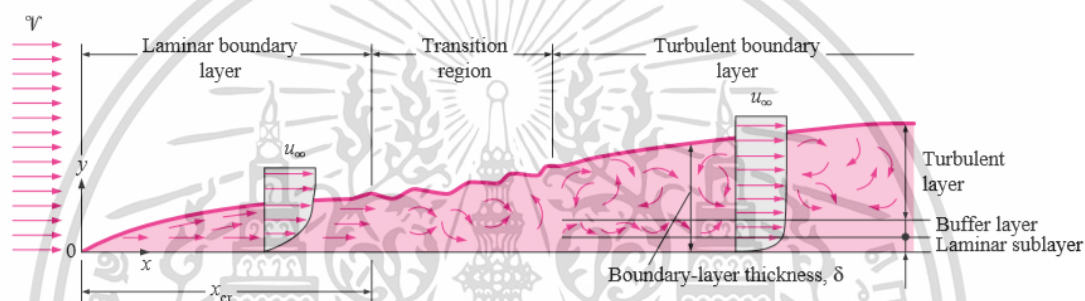
ช่วงทางเข้าของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะมีพฤติกรรมของการไหลและการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอิทธิพลของคุณสมบัติของของไหล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาการไหลของของไหลในช่วงทางเข้านั้น โดยพฤติกรรมปรับตัวของของไหลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ การเปลี่ยนแปลงของรูปร่างความเร็วของของไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอุณหภูมิของของไหล ทั้งสองส่วนนี้มีความสำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์การพาความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพที่ 2.1 แสดงการพัฒนาชั้นขีดความเร็วผิวของการไหลภายในท่อ

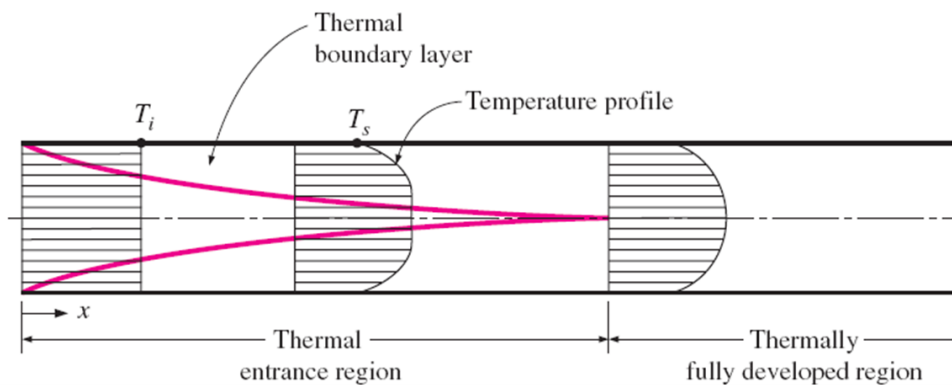
จากภาพ 2.1 แสดงถึงพฤติกรรมปรับตัวของของไหลในส่วนความเร็ว เมื่อของไหลไหลเข้าสู่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างความเร็วนี้เรียกว่า ชั้นขีดความเร็ว (Velocity boundary layer) ซึ่งจะได้รับอิทธิพลเนื่องจากคุณสมบัติความหนืดของของไหล ซึ่งทำให้ความเร็วของชั้นของของไหลที่ติดอยู่กับผิวท่อที่มีความเร็วเป็นศูนย์ ชั้นของของไหลที่ถัดออกมาจากผิวท่อจะมีค่าความเร็วเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ กระทั่งมีความเร็วเท่ากับความเร็วอิสระของของไหล

บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างความเร็วตั้งแต่ทางเข้าถึงจุดที่ขอบเขตของชั้นความเร็ว (Velocity boundary layer) บรรจบกันที่กึ่งกลางท่อ เรียกว่า ช่วงปรับตัวที่ทางเข้า (Hydrodynamic entrance region) ความยาวของช่วงเรียกว่า ความยาวของการปรับตัวของความเร็วบริเวณทางเข้าและการไหลในช่วงนี้ เรียกว่า การไหลที่กำลังพัฒนารูปร่างของความเร็ว (Hydrodynamically developing flow) โดยระยะหลังจากบริเวณนี้รูปร่างความเร็วของของไหลจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเนื่องจากระยะตามความยาวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนอีก เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงปรับตัวเต็มที่ของความเร็ว (Hydrodynamically fully developed region) ความเร็วของของไหลที่น้อยที่สุดจะอยู่ที่บริเวณชั้นที่ติดกับผิวของท่อ ส่วนบริเวณที่ของไหลมีค่าความเร็วมากที่สุดอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของท่อ



ภาพที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงขอบเขตของชั้นความเร็วบนแผ่นเรียบสำหรับการไหลที่แตกต่างกัน

กรณีการไหลขนานไปบนแผ่นเรียบ ดังภาพที่ 2.2 ความเร็วของอนุภาคในชั้นที่ติดกับผิวของแผ่นเรียบจะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากเงื่อนไขการไม่เลื่อนไถล ชั้นของของไหลที่ไม่เคลื่อนที่ส่งผลให้ของไหลโดยรอบเคลื่อนที่ช้าลงด้วยเพราะผลจากแรงเสียดทาน ชั้นความเร็วที่เกิดขึ้นในการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วนจะมีความแตกต่างกันโดยการไหลแบบปั่นป่วนจะมีการกระจายตัวของความเร็วที่มากกว่าการไหลแบบราบเรียบ รูปแบบของความเร็วในช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะเป็นรูปพาราโบลาโบลิค (Parabolic) สำหรับการไหลแบบราบเรียบ และเรียกว่าสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน



ภาพที่ 2.3 แสดงการพัฒนาชั้นขีดผิวความร้อนภายในท่อ (ของไหลเป็นของไหลร้อน)

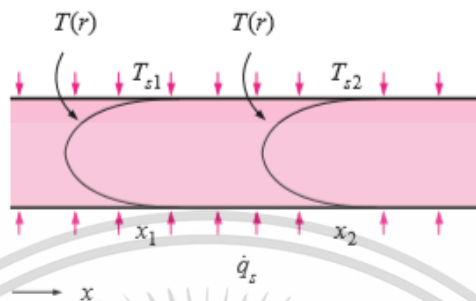
พิจารณาของไหลที่ไหลเข้าท่อด้วยความเร็วเริ่มต้นขนานกับแกน x และมีความสม่ำเสมอ ดังที่แสดงในภาพที่ 2.3 บริเวณตั้งแต่ทางเข้าจนถึงจุดที่ขอบเขตของชั้นความร้อน (Thermal boundary layer) บรรจบกันที่กึ่งกลางของท่อ เรียกว่า ช่วงทางเข้า (Thermal entrance region) ความยาวของระยะที่เกิดการปรับตัวของชั้นขีดผิวความร้อน เรียกว่า ความยาวของการปรับตัวของความร้อนบริเวณทางเข้า การไหลช่วงที่เกิดการปรับตัวของรูปแบบความร้อน เรียกว่า การไหลที่กำลังพัฒนารูปร่างของความร้อน (Thermally developing flow) หลังจากนั้นรูปร่างของความร้อนและ อุณหภูมิไร้มิติจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เรียกว่า ช่วงปรับตัวเต็มที่ของอุณหภูมิ (Thermally fully developed region) หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right] = 0 \quad (2.4)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งใด ๆ
 T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิว
 T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดของช่องการไหล

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (2.4) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่องทางไหลอาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่หรือ T_s คงที่ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ผนังท่อซึ่งได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอจะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนกรณี T_s คงที่จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนสถานะ (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

ในกรณีที่ของไหลเป็นของไหลเย็น การเปลี่ยนแปลงของรูปร่างอุณหภูมิจะเป็นดังภาพที่ 2.4 คือบริเวณชั้นของของไหลที่ติดอยู่กับผิวท่อจะมีอุณหภูมิมากที่สุด และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จนถึงกึ่งกลางท่อซึ่งมีค่าอุณหภูมิต่ำที่สุด



ภาพที่ 2.4 แสดงการพัฒนาชั้นขีดผิวความร้อนภายในท่อ (ของไหลเย็นของไหลเย็น)

ในการหาค่าการถ่ายเทความร้อนจำเป็นต้องทราบว่าการถ่ายเทความร้อนที่ทำการวิเคราะห์เป็นช่วงการไหลที่กำลังปรับตัวหรือเป็นช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว เนื่องจากทั้ง 2 ช่วงนี้จะมีค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่แตกต่างกัน

ระยะจากทางเข้าสำหรับปรับตัวของของไหลทั้งในส่วนของการพาความร้อนและรูปร่างอุณหภูมิสำหรับการไหลราบเรียบและปั่นป่วนจะสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$L_{h,laminar} \approx 0.05 \text{Re} D_h \quad (2.5)$$

$$L_{t,laminar} \approx 0.05 \text{Re} \text{Pr} D_h = \text{Pr} L_{h,laminar} \quad (2.6)$$

$$L_{h,turbulent} \approx L_{t,turbulent} \approx 10 D_h \quad (2.7)$$

เมื่อ Pr คือ เลขพรันด์เทิล (Prandtl number)

การไหลที่อยู่ในช่วงปรับตัวเต็มที่ของทั้งความเร็วและอุณหภูมิ โดยรูปแบบความเร็วและอุณหภูมิไว้มิติไม่มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว เรียกว่าการไหลปรับตัวเต็มที่ (Fully developed flow)

2.2.4 ความเร็วเฉลี่ยและอุณหภูมิ

ความเร็วของไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเท่ากับศูนย์ที่ผนังของท่อเนื่องจากเงื่อนไขการไม่เลื่อนไหลของผนังรวมทั้งอิทธิพลของค่าความหนืดของของไหลและจะมีความเร็วสูงสุดที่บริเวณกลางท่อ ดังนั้นการคำนวณการไหลภายในท่อมักจะใช้ค่าความเร็วเฉลี่ยในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณการไหลในท่อสามารถสามารถวัดได้ในรูปของอัตราการไหลเชิงมวล ดังสมการที่ (2.8) หรือในรูปของอัตราการไหลเชิงปริมาตร ดังสมการที่ (2.9)

$$\dot{m} = \rho V_{avg} A_c \quad (2.8)$$

$$\dot{V} = V_{avg} A_c \quad (2.9)$$

สำหรับการไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้ ค่าความเร็วเฉลี่ยสำหรับอุปกรณ์ทำความร้อนและอุปกรณ์ทำความเย็นอาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นเมื่อค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม ค่าคุณสมบัติของของไหลจะพิจารณาที่อุณหภูมิเฉลี่ยบัค ซึ่งใช้วิธีการเฉลี่ยอุณหภูมิแบบ arithmetic จากอุณหภูมิทางเข้าและทางออก ดังสมการต่อไปนี้

$$T_b = \frac{T_{m,i} - T_{m,e}}{2} \quad (2.10)$$

เมื่อ $T_{m,i}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยขาเข้า
 $T_{m,e}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยขาออก

2.2.5 การสูญเสียความดันและค่าตัวประกอบเสียดทาน

ปริมาณที่น่าสนใจสำหรับการไหลภายในท่อคือ ความดันตกคร่อม ซึ่งจะมีผลโดยตรงกับกำลังของปั๊มและพัดลม เราสามารถนิยามได้ว่าเป็นความแตกต่างของความดันระหว่างระยะใด ๆ สามารถเขียนได้ในรูปดังต่อไปนี้

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P_1 - P_2}{L} \quad (2.11)$$

โดยทั่วไปเมื่อต้องการพิจารณาค่าความดันตกคร่อมสำหรับการไหลภายในท่อทุกแบบ ทั้งในท่อกลมหรือท่อเหลี่ยมและการไหลแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน จะพิจารณาในรูปของการสูญเสียความดัน ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho V_{avg}^2}{2} \quad (2.12)$$

เมื่อ f คือ ตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\frac{\rho V_{avg}^2}{2}$ คือ ความดันพลศาสตร์

L คือ ความยาวของท่อที่วัดความดันตกคร่อมได้

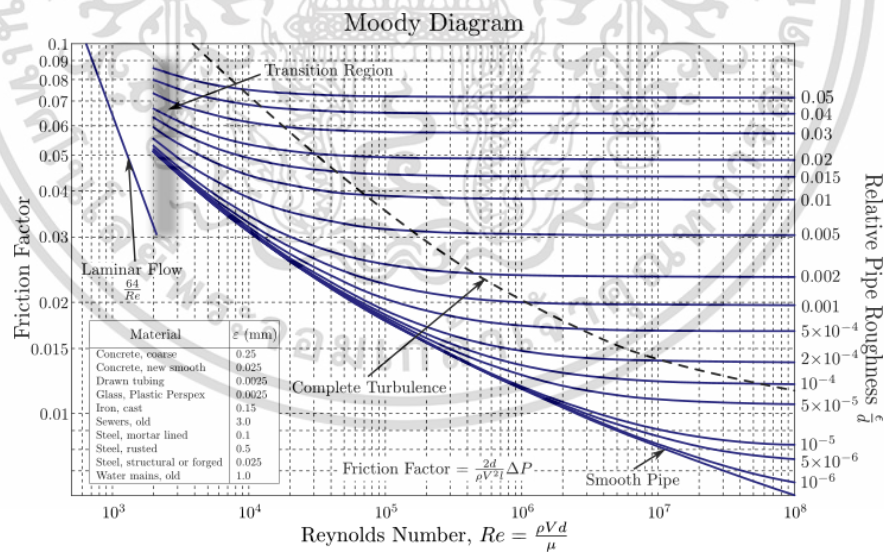
กำลังของปั๊มหรือพัดลมที่ต้องใช้สำหรับการทดแทนการสูญเสียความดัน สามารถหาได้จาก

$$\dot{W} = \dot{V} \Delta P \tag{2.13}$$

ค่าตัวประกอบเสียดทานของ Moody หรือ Darcy เป็นตัวแปรไร้มิติที่สามารถกำหนดได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$f_{Darcy} \equiv \frac{(\frac{\Delta P}{L}) D_h}{\rho V_{avg}^2 / 2} \tag{2.14}$$

แผนภาพของ Moody แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าตัวประกอบเสียดทานของ Darcy-Weisbach เลขเรย์โนลด์ส์ และค่าความขรุขระของพื้นผิว สำหรับช่วงการไหลที่ปรับตัวเต็มที่ภายในท่อ ซึ่งสามารถใช้ทำนายความดันตกคร่อมหรืออัตราการไหลในท่อได้



ภาพที่ 2.5 แผนภาพของ Moody

การประมาณค่าสำหรับท่อผิวเรียบ โดย Blasius (1913) ในรูปของตัวประกอบเสียดทานของ Moody สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = 0.316 \text{Re}^{-\frac{1}{4}} \quad \text{Re} \leq 20,000 \quad (2.15)$$

$$f = 0.184 \text{Re}^{-\frac{1}{5}} \quad \text{Re} \geq 20,000 \quad (2.16)$$

2.2.6 พื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน

2.2.6.1 กลไกการถ่ายเทความร้อน

ความร้อน คือพลังงานที่สามารถถ่ายโอนจากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่งได้เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่างกัน โดยการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ และจะหยุดการถ่ายเทความร้อนเมื่อบริเวณทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากัน

วิธีการถ่ายเทพลังงานความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน โดยทุกวิธีจำเป็นต้องมีความแตกต่างของอุณหภูมิ

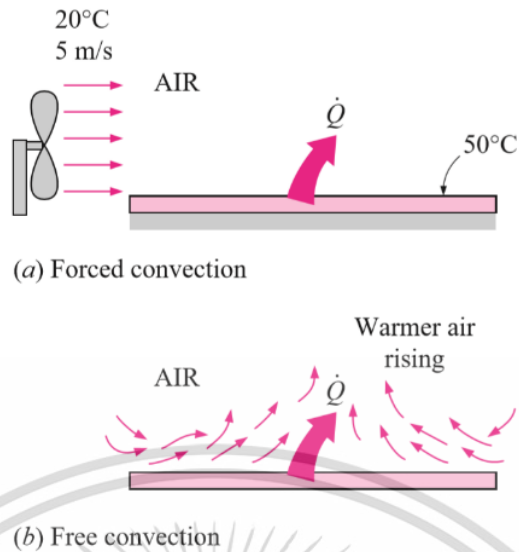
1. การนำความร้อน คือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยอาศัยการกระทำระดับอนุภาคสามารถเกิดได้ในตัวกลางทั้งของแข็ง ของเหลวและแก๊ส ในของเหลวและแก๊สการนำความร้อนเกิดจากการชนและฟุ้งกระจายของโมเลกุล แต่ในของแข็งจะเกิดจากการสั่นของโมเลกุลจากอนุภาคหนึ่งไปยังอีกอนุภาคหนึ่ง

2. การพาความร้อน เป็นรูปแบบของการถ่ายเทพลังงานระหว่างพื้นผิวที่เป็นของแข็งกับตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือแก๊สที่เคลื่อนที่ เป็นการผสมพฤติกรรมของการนำความร้อนและการเคลื่อนที่ของของไหล อัตราเร็วของของไหลมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ยิ่งของไหลมีความเร็วมากการถ่ายเทความร้อนก็ย่อมมากขึ้นตาม

3. การแผ่รังสีความร้อน เป็นพลังงานที่ปล่อยออกมาจากสสารในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอน (Photons) อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าทางอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมหรือโมเลกุล ซึ่งการแผ่รังสีความร้อนไม่จำเป็นต้องมีตัวกลาง ในความเป็นจริงการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเร็วที่สุด รวมถึงไม่เกิดการสูญเสียเนื่องจากสภาวะสุญญากาศ

2.2.6.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนเมื่อแบ่งตามลักษณะการเกิดการพาความร้อนสามารถแบ่งได้เป็นการพาความร้อนแบบบังคับและการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การพาความร้อนแบบบังคับและการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

ภาพที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น การถ่ายเทความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) ในรูปด้านบน จะมีแรงลมจากพัดลมเป่าผ่านผิวความร้อน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน จะเห็นได้ว่าการถ่ายเทความร้อนรูปแบบนี้ต้องอาศัยแรงมาทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตัวกลางเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ในขณะที่รูปด้านล่างเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ (Free convection) การเคลื่อนที่ของตัวกลางในการพาความร้อนไม่จำเป็นต้องใช้แรงภายนอกช่วยในการเคลื่อนที่ เนื่องจากผลของแรงลอยตัวของอากาศ อากาศบริเวณที่ใกล้กับผิวร้อนจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นและมีความหนาแน่นที่น้อยลงจึงลอยตัวสูงขึ้น อากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่าในบริเวณใกล้เคียงจะเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศในบริเวณนั้น

การพาความร้อนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนืด สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่นและความเร็วของตัวกลาง นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของของไหลเข้ามาเกี่ยวข้องอีก เช่น ความขรุขระและรูปร่างของพื้นผิว

การวิเคราะห์ความร้อนที่ผิวจะแบ่งออกเป็นพื้นผิวที่มีอุณหภูมิผิวคงที่และฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในกรณีที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่ เช่น การใช้แผ่นให้ความร้อนกับผิว ค่าฟลักซ์ความร้อนสามารถหาได้จากสมการ

$$\dot{q} = h(T_s - T_b) \quad (2.18)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการพาความร้อนสามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_b) \quad (2.19)$$

เมื่อ A_s คือ พื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน

2.2.7 เลขนัสเซิลต์ (Nusselt number)

สำหรับการพาความร้อน ตัวแปรไร้มิติที่แสดงถึงอัตราการถ่ายเทความร้อน คือ เลขนัสเซิลต์ สามารถคำนวณได้จาก

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (2.20)$$

เมื่อ L_c คือ ความยาวเฉพาะ (Characteristic length) ที่มีค่าเท่ากับ D สำหรับท่อกลม
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conduction heat transfer coefficient)
 หรือพิจารณาในรูปอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของการพาความร้อนต่อฟลักซ์ของการนำความร้อน

$$\frac{\dot{q}_{conv}}{\dot{q}_{cond}} = \frac{h\Delta T}{k\Delta T / L} = \frac{hL}{k} = Nu$$

จากสมการข้างต้น เลขนัสเซิลต์แสดงถึงอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนด้วยการพากับการนำความร้อนที่ของไหลเดียวกัน เลขนัสเซิลต์ที่มากแสดงถึงการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาที่มากและถ้า $Nu = 1$ หมายความว่า การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว

เลขนัสเซิลต์สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่รู้จักกันในชื่อ Colburn equation ถูกปรับเปลี่ยนให้มีความแม่นยำที่เพิ่มมากขึ้นและนำเสนอโดย Dittus-Boelter (1930) ดังสมการต่อไปนี้

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (2.21)$$

สมการนี้ถูกเรียกว่า Dittus-Boelter equation โดยที่ n มีค่า 0.4 เมื่อเป็นการเพิ่มความร้อน และมีค่า 0.3 เมื่อเป็นการทำความเย็นของของไหลภายในท่อ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่แล้วภายในท่อกลมผิวเรียบ ในเลขเรย์โนลด์ส์ $Re \geq 10,000$

2.2.8 การวิเคราะห์ความร้อนทั่วไป

การถ่ายเทความร้อนให้กับของไหลที่ไหลในท่อจะมีค่าเท่ากับพลังงานที่เพิ่มขึ้นของของไหล หรือ ความร้อนที่ของไหลได้รับมีค่าเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทให้กับของไหล ค่าความร้อนที่ของไหลได้รับสามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_e - T_i) \quad (2.22)$$

เมื่อ c_p คือ ความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity)

T_e คือ อุณหภูมิบริเวณทางออกของของไหล

T_i คือ อุณหภูมิทางเข้าของของไหล

เมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดเกิดจากการพาความร้อน สัมประสิทธิ์การพาความร้อน จะสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{Q}_{conv} \\ \dot{m} c_p (T_e - T_i) &= h A_s (T_s - T_b) \\ h &= \frac{\dot{m} c_p (T_e - T_i)}{A_s (T_s - T_b)} \end{aligned} \quad (2.23)$$

2.2.9 ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน คือ อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของผิวที่ทดสอบกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของผิวเรียบ โดย Promvong and Skullong (2020) ได้นำเสนอค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$TEF = \frac{h}{h_0} \Big|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \Big|_{pp} = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-16/55} \quad (2.24)$$

เมื่อ Nu คือ เลขนัสเซิลต์ของท่อที่ติดตั้งปีกรูปตัววี

Nu_0 คือ เลขนัสเซิลต์ของท่อผิวเรียบ

f คือ ค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อที่ติดตั้งปีกรูปตัววี

f_0 คือ ค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.10 สมมุติฐานของการไหลและสมการควบคุม

การคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววีและมีการให้ความร้อนที่ผิว มีสมมุติฐานของการไหลดังนี้

1. การไหลและการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงตัว 3 มิติ
2. เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและอัดตัวไม่ได้
3. เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง
4. คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลมีค่าคงที่
5. ไม่พิจารณาแรงวัตถุ

สมการที่ควบคุมการไหลประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม (หรือเรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์) และสมการพลังงาน เมื่อพิจารณาภายใต้สมมุติฐานข้างต้น สมการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (2.25)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho u_i u_j \right) \right] \quad (2.26)$$

สมการพลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\Gamma + \Gamma_t) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (2.27)$$

เมื่อ Γ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่เชิงความร้อน มีสมการเป็น $\Gamma = \mu / Pr$

Γ_t คือ สัมประสิทธิ์การแพร่เชิงความร้อนปั่นป่วน มีสมการเป็น $\Gamma_t = \mu_t / Pr_t$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $-\overline{\rho u_i u_j}$ คือ Reynold stress มีสมการเป็น

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (2.28)$$

กลุ่มสมการควบคุมการไหลข้างต้นเมื่อใช้ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม สามารถนำไปวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบได้ แต่ถ้านำสมการควบคุมดังกล่าวมาวิเคราะห์ปัญหาเฉพาะตัวของการไหลแบบปั่นป่วน จะก่อให้เกิดความยุ่งยากในการวิเคราะห์เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นในส่วนถัดไปจะนำเสนอพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อนำไปสู่สมการของแบบจำลองความปั่นป่วนรูปแบบต่าง ๆ

2.2.11 การคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง

การคำนวณการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง (periodic flow) ถูกนำมาใช้ในการวิจัยนี้เพื่อลดจำนวนของกริดเซลล์และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ สำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่วงที่มีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการวิเคราะห์การไหลลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อรูปทรงทางเรขาคณิตและรูปแบบที่ต้องการหาค่าผลเฉลยของการไหลและการถ่ายเทความร้อนมีการซ้ำกันอย่างต่อเนื่อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.11.1 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว

การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็วเป็นลักษณะการไหลเมื่อมีความดันตกคร่อมเกิดขึ้นข้ามขอบเขตการไหลตามแนวทิศทางการไหล โดยเกิดขึ้นกับการไหลที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์แล้ว สถานะการไหลซ้ำเป็นช่วงนี้จะเกิดขึ้นหลังจากมีช่วงความยาวทางเข้าที่เพียงพอ โดยขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ของการไหลและ รูปร่างของช่องทางการไหล

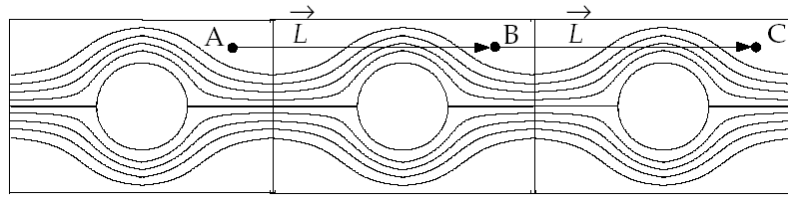
1. นิยามของความเร็วเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

เมื่อรูปแบบการไหลเกิดขึ้นในช่วงการไหล L โดยมีค่าความดันตกคร่อมคงที่ในช่วงโมดูลนั้น ๆ ตามทิศทางการไหล นิยามของการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความเร็ว ถูกกำหนดโดยค่าของความเร็วย่อยนั้นจะซ้ำกันในตัวมันเอง ดังสมการที่ 2.29 และภาพที่ 2.7

$$u_i(\vec{r}_i) = u_i(\vec{r}_i + \vec{L}) = u_i(\vec{r}_i + 2\vec{L}) = \dots \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.29)$$

เมื่อ \vec{r} คือ เวกเตอร์บอกตำแหน่ง

\vec{L} คือ เวกเตอร์ความยาวที่ซ้ำเป็นช่วงของขอบเขตการไหล



ภาพที่ 2.7 แสดงรูปทรงเรขาคณิตที่ซ้ำเป็นช่วง

จากภาพที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ได้ว่า

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

2. นิยามของความดันเมื่อมีการไหลซ้ำเป็นช่วง

สำหรับการไหลแบบมีความหนืด ค่าของความดันจะไม่ซ้ำเป็นช่วงตามนิยามของความเร็ว แต่ค่าความดันตกคร่อมในช่วงการไหลหรือโมดูลนั้น ๆ จะมีค่าเท่ากัน แสดงได้ดังสมการ 2.30

$$\Delta p = p(\vec{r}) - p(\vec{r} + \vec{L}) = p(\vec{r} + \vec{L}) - p(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \quad (2.30)$$

ค่าเกรเดียนต์ของความดันเฉพาะที่ สามารถแยกได้เป็นสองส่วน คือ ส่วนของเกรเดียนต์ที่ซ้ำเป็นช่วง ($\vec{\nabla} p(\vec{r})$) และส่วนเกรเดียนต์ของการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น ($\beta \frac{\vec{L}}{|\vec{L}|}$) แสดงได้ดังสมการ 2.31

$$\vec{\nabla} p(\vec{r}) = \beta \frac{\vec{L}}{|\vec{L}|} + \vec{\nabla} \tilde{p}(\vec{r}) \quad (2.31)$$

เมื่อ $\tilde{p}(\vec{r})$ คือ ความดันที่ซ้ำกันเป็นช่วง (periodic pressure)

$\beta|\vec{r}|$ คือ ส่วนของการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นของความดัน

2.2.11.2 การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อน

การไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนตามแนวการไหลนั้นจะเกิดขึ้นได้สำหรับการกำหนดให้ความร้อนที่ผนังท่อมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างขอบเขตที่ซ้ำเป็นช่วงจะมีค่าคงที่ และสัมพันธ์กับการเพิ่มความร้อนสุทธิจากขอบเขตของผนัง โดยอธิบายได้ดังสมการนี้

$$\frac{T(\vec{r} + \vec{L}) - T(\vec{r})}{L} = \frac{T(\vec{r} + 2\vec{L}) - T(\vec{r} + \vec{L})}{L} = \sigma \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ σ คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนได้ในเทอมของการเพิ่มความร้อนทั้งหมด ดังสมการ

$$\sigma = \frac{Q}{\dot{m}c_p L} = \frac{T_{bulk,exit} - T_{bulk,inlet}}{L} \quad (2.33)$$

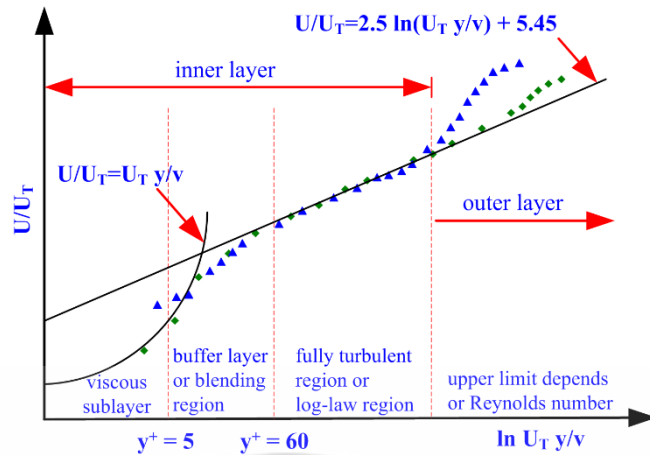
เมื่อ m คืออัตราการไหลเชิงมวลที่กำหนดให้ และ T_{bulk} อินทิเกรตตลอดพื้นที่หน้าตัดของโดเมนการไหลที่เข้าเป็นช่วง, A นิยามโดย

$$T_{bulk} = \frac{\int_A T |\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}|}{\int_A |\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}|} \quad (2.34)$$

2.2.12 การวิเคราะห์บริเวณใกล้ผนังสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต

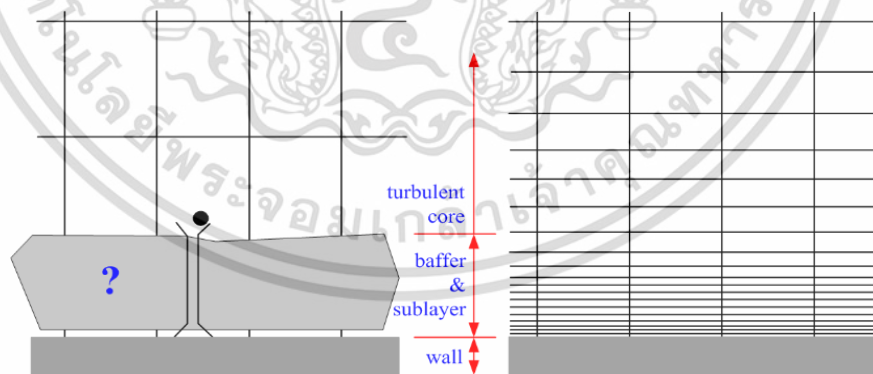
การไหลแบบปั่นป่วนได้รับอิทธิพลที่สำคัญจากผนังขอบเขต และเห็นได้ชัดว่าสนามความเร็วเฉลี่ยได้รับอิทธิพลจากเงื่อนไขของผนังที่ไม่มี การลื่นไถล (no-slip condition) ดังนั้นแบบจำลองสำหรับบริเวณใกล้ผนัง (near-wall modeling) จึงมีความสำคัญต่อการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขอย่างมาก

การทดลองการไหลที่มีผนังเป็นขอบเขตได้แสดงให้เห็นถึงการแบ่งชั้นชนิดผิวของของไหลออกเป็น 3 ส่วน โดยชั้นด้านในสุด (ชั้นที่อยู่ติดกับผนัง) การไหลของของไหลเกือบจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ เรียกว่า viscous sublayer ซึ่งความหนืดจะส่งผลกระทบต่อ การถ่ายโอนของโมเมนตัมมวล และความร้อน ชั้นด้านนอกสุดเรียกว่า fully-turbulent layer ซึ่งความปั่นป่วนจะมีอิทธิพลที่สำคัญที่สุด ส่วนชั้นที่อยู่ระหว่างชั้น viscous sublayer กับ fully-turbulent layer อิทธิพลของความหนืดและความปั่นป่วนจะมีความสำคัญเท่ากัน การแบ่งชั้นชนิดผิวโดยพล็อตในพิกัด semi-log ได้แสดงในภาพที่ 2.8 ซึ่ง $y^+ \equiv \rho u_\tau y / \mu$ เมื่อ u_τ คือแรงเสียดทานความเร็ว กำหนดโดย $\sqrt{\tau_w} / \rho$



ภาพที่ 2.8 การแบ่งของชั้นขีตผิว

โดยทั่วไปแล้วจะมี 2 วิธีในการสร้างแบบจำลองบริเวณใกล้ผนัง สำหรับวิธีที่หนึ่งเรียกว่าวิธีการใช้ฟังก์ชันผนัง (wall function approach) วิธีนี้อธิพลของค่าความหนืดในบริเวณการไหลชั้นย่อยหนืดไม่ได้ถูกคำนวณโดยตรงแต่จะใช้สมการเชิงทดลองซึ่งเรียกว่าฟังก์ชันผนัง (wall functions) เป็นตัวเชื่อมระหว่างบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืดในบริเวณใกล้ผนัง กับบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการใช้ฟังก์ชันผนังนั้นทำให้ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้การปรับปรุงแบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับอิทธิพลของการมีอยู่ของผนัง ส่วนวิธีที่สองเป็นวิธีการจำลองใกล้ผนัง (near-wall modeling approach) คือวิธีการปรับปรุงแบบจำลองความปั่นป่วนให้สามารถแก้ปัญหาบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืดด้วยการใช้กริดเซลล์ทั่วทั้งบริเวณที่อยู่ใกล้ผนังซึ่งรวมทั้งบริเวณการไหลในชั้นย่อยหนืด ลักษณะของบริเวณใกล้ผนังของทั้ง 2 วิธี แสดงไว้ดังภาพที่ 2.9



วิธีฟังก์ชันผนัง

- ✘ อิทธิพลของความหนืดบริเวณใกล้ผนังไม่สามารถแก้ปัญหาได้
- ✘ สามารถใช้กับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีเลข Re สูง ๆ ได้

วิธีการจำลองใกล้ผนัง

- ✘ อิทธิพลของความหนืดบริเวณใกล้ผนังสามารถแก้ปัญหาได้
- ✘ แบบจำลองความปั่นป่วนควรใช้การจำลองใกล้ผนัง

ภาพที่ 2.9 ลักษณะของกริดบริเวณใกล้ผนังใน ANSYS FLUENT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของวิธีของฟังก์ชันผนังนั้นสามารถประหยัดทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ได้ และเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนังในเชิงอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวไม่เหมาะสมสำหรับการไหลที่อยู่ในสภาวะการไหลบางกรณีดังนี้

1. การไหลอยู่ภายใต้อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ต่ำที่กระจายไปทั่วทั้งโดเมนในสนามการไหล
2. การไหลที่เกิดกระเด็นของความดันอย่างรุนแรงซึ่งนำไปสู่การแยกไหลของชั้นขีดผิว
3. มีการไหลแบบ 3 มิติในบริเวณใกล้กับผนังนั้นคือเกิดการไหลแบบบิดตัวอย่างรุนแรงของชั้นขีดผิวแบบ 3 มิติ

จากสภาวะการไหลดังกล่าว สมมุติฐานของการใช้ฟังก์ชันผนังนั้นจะไม่ถูกต้อง ซึ่งพบว่าการไหลในท่อที่มีพื้นผิวขรุขระ มีลักษณะสอดคล้องกับการไหลในกรณีดังกล่าวข้างต้น การแก้ปัญหาการไหลนี้จึงใช้วิธีการจำลองใกล้ผนัง ร่วมกับการใช้จำนวนกริดเซลล์ที่เหมาะสมในบริเวณใกล้กับผนัง โดยวิธีการนี้เรียกว่า enhanced wall treatment

ถึงแม้ว่า enhanced wall treatment ถูกออกแบบให้มีความแม่นยำสำหรับการจำลองการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนัง แต่ยังคงต้องมีการสร้างกริดเซลล์ที่ใช้สำหรับการคำนวณอย่างสมบูรณ์ในบริเวณการไหลใกล้กับผนังที่ได้รับอิทธิพลของความหนืด ซึ่งเมื่อมีการใช้ enhanced wall treatment เพื่อคำนวณการไหลในชั้นย่อยหนืด ค่า y^+ ที่ติดกับผนังควรมีค่าเท่ากับ 1 แต่อย่างไรก็ตามค่า y^+ ที่มีค่าสูงกว่านี้และสามารถยอมรับได้คือ $y^+ < 4$ ถึง 5

2.2.13 การจำลองการไหลใกล้ผนังด้วยวิธี enhanced wall treatment

วิธี enhanced wall treatment เป็นวิธีการจำลองการไหลใกล้ผนังซึ่งถูกใช้ในแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k-\epsilon$ โดยมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองการไหล 2 ชั้น (two-layer model) ซึ่งวิธีนี้โดเมนการไหลทั้งหมดได้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ บริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืดกับบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ และขอบเขตของทั้งสองบริเวณนั้นสามารถหาได้โดยการใช้ระยะทางจากผนัง ซึ่งเรียกว่าเลขเรย์โนลด์ปั่นป่วน, Re_y (turbulent Reynolds number) ซึ่งมีนิยามเป็น

$$Re_y \equiv \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \quad (2.35)$$

เมื่อ y คือ ระยะทางที่วัดตั้งฉากจากผนังไปยังจุดศูนย์กลางเซลล์

ในบริเวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์นั้น ($Re_y \geq 200$ ซึ่ง $Re_y^* = 200$) แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณ

ในบริเวณการไหลที่ใกล้กับผนังซึ่งได้รับอิทธิพลของความหนืด ($Re_y < 200$) แบบจำลอง 1 สมการ (one-equation model) จะถูกนำมาใช้ ซึ่งมีเพียงสมการ k เท่านั้นที่ถูกใช้ในบริเวณนี้ โดยที่ค่าความหนืดปั่นป่วน, μ_t สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mu_{t,2layer} = \rho C_\mu \ell_\mu \sqrt{k} \quad (2.36)$$

เมื่อ ℓ_μ คือ ค่าบ่งชี้ลักษณะเชิงขนาด (length scale) คำนวณได้จากสมการ

$$\ell_\mu = y C_\ell^* (1 - e^{-Re_y/A_\mu}) \quad (2.37)$$

นิยามของการไหล 2 ชั้น ผสมผสานกันอย่างราบรื่นกับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูง และค่าของ μ_t สำหรับการไหลด้านนอกมีสมการคือ

$$\mu_{t,enh} = \lambda_\varepsilon \mu_t + (1 - \lambda_\varepsilon) \mu_{t,2layer} \quad (2.38)$$

เมื่อค่า μ_t สำหรับการไหลที่เลขเรย์โนลด์สูงถูกกำหนดไว้ในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ และนอกจากนี้ฟังก์ชันการผสมผสาน (blending function), λ_ε ถูกกำหนดให้เท่ากับหนึ่งสำหรับบริเวณที่ไกลจากผนัง และมีค่าเท่ากับศูนย์สำหรับบริเวณที่อยู่ใกล้กับผนังมาก ซึ่งฟังก์ชันการผสมผสานมีสมการคือ

$$\lambda_\varepsilon = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{Re_y - Re_y^*}{A} \right) \right] \quad (2.39)$$

ค่าคงที่ A สามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$A = \frac{|\Delta Re_y|}{\tanh(0.98)} \quad (2.40)$$

โดยทั่วไปค่า ΔRe_y ถูกกำหนดให้มามีค่าอยู่ระหว่าง 5% ถึง 25% ของค่า Re_y^* ซึ่งวัตถุประสงค์ของการมีฟังก์ชันการผสมผสานคือป้องกันการขาดช่วงการลู่เข้า เมื่อผลเฉลยจากการคำนวณจากแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ที่ชั้นด้านนอกไม่สอดคล้องกับสมการของวิธีจำลองการไหล 2 ชั้น

ค่าของ ε ในสนามการไหลคำนวณจากสมการ

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_\varepsilon} \quad (2.41)$$

ค่า l_ε คำนวณจากสมการ

$$l_\varepsilon = yC_\ell^* (1 - e^{-\text{Re}_y/A_\varepsilon}) \quad (2.42)$$

ถ้าโดเมนการไหลทั้งหมดอยู่ในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความหนืด ($\text{Re}_y < 200$) ค่า ε จะไม่ได้คำนวณมาจากการแก้สมการการเคลื่อนย้าย แต่จะใช้ค่าในสมการที่ (2.41)

ค่าคงที่ซึ่งอยู่ในสมการค่าบ่งชี้ลักษณะเชิงขนาด มีดังนี้

$$C_\ell^* = \kappa C_\mu^{-3/4}, \quad A_\mu = 70, \quad A_\varepsilon = 2C_\ell^*$$

2.2.14 แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\varepsilon$

แบบจำลอง Realizable $k-\varepsilon$ มีจุดมุ่งหมายเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ดั้งเดิม โดยการนำเสนอรูปแบบต่อไปนี้

1. สูตรความหนืดหมุนวนแบบใหม่ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปร C_μ ถูกนำเสนอโดยเรย์โนลด์ส์
2. สมการรูปแบบใหม่สำหรับการกระจาย (ε) ตามสมการไดนามิกของการผันผวน

ความเร็วเฉลี่ย

สมการการเคลื่อนย้ายของแบบจำลอง Realizable $k-\varepsilon$ สำหรับ k และ ε คือ

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho\varepsilon - Y_m + S_k \quad (2.43)$$

และ

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2.44)$$

เมื่อ

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการเหล่านี้ G_k แสดงให้เห็นถึงการสร้างพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากการเค้นความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณตามที่ได้อธิบายไว้ในการสร้างแบบจำลองการสร้างความปั่นป่วนในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ซึ่ง G_b คือพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากการลอยตัวซึ่งคำนวณตามที่ได้อธิบายไว้ในผลกระทบของการลอยตัวบนความปั่นป่วนในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ส่วน Y_m คือการเกี่ยวข้องของการขยายตัวผันผวนในการปั่นป่วนอัดตัวกับอัตราการกระจายซึ่งสามารถคำนวณได้ตามที่ได้อธิบายไว้ในผลกระทบของการอัดปั่นป่วนในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ เมื่อ C_2 และ $C_{1\varepsilon}$ คือค่าคงที่ σ_k และ σ_ε คือเลขพารามิเตอร์ปั่นป่วนสำหรับ k และ ε ตามลำดับ S_k และ S_ε คือซอร์ซเทอม

ค่าคงที่ C_2 , σ_k และ σ_ε ได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อนำมาให้แน่ใจว่ารูปแบบของการไหลนั้นมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าคงที่สำหรับแบบจำลองคือ $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9$

2.2.15 พลังงานจลน์ปั่นป่วน

สำหรับการนำเสนอแบบจำลองความปั่นป่วนนั้น ในเบื้องต้นจะทำความเข้าใจเกี่ยวกับความหมายของพลังงานจลน์ต่อหน่วยมวล ณ ระยะเวลาหนึ่ง ๆ หรือหมายถึงความเข้มข้นของความปั่นป่วน โดยมีสัญลักษณ์ $k(t)$ ซึ่งคือผลบวกของพลังงานจลน์อันเนื่องมาจากกระแสการไหลเฉลี่ย

$$K = \frac{1}{2}(U^2 + V^2 + W^2) \text{ และพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน } k \text{ นั้นคือ}$$

$$k(t) = K + k \quad (2.45)$$

นอกจากนี้ค่าความเข้มข้นของความปั่นป่วน T_i นั้นเป็นค่าที่เชื่อมโยงกับค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนกับพลังงานจลน์ของการไหลเฉลี่ย แสดงไว้ดังสมการ

$$T_i = \frac{\left(\frac{2}{3}k\right)^{1/2}}{U_{ref}} \quad (2.46)$$

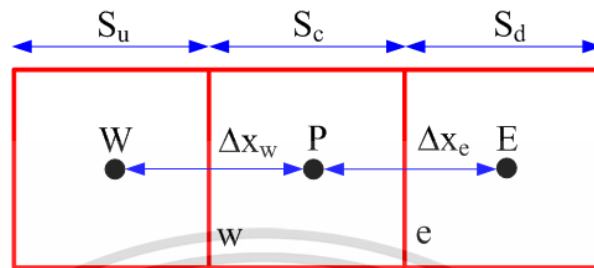
2.2.16 วิธีปริมาตรสี่บเนื่องกับการพาและแพร่แบบคงตัว

2.2.16.1 วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK

วิธีการประมาณค่าแบบ QUICK (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) ใช้สำหรับการคำนวณค่าที่ผิวเซลล์ ϕ_f ที่มีอันดับความแม่นยำที่สูงขึ้น โดยใช้พื้นฐานของการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของวิธีการประมาณค่าต้นลมอันดับสองร่วมกับวิธีการประมาณค่าของตัวแปรที่ศูนย์กลาง สำหรับผิวเซลล์ e ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งถ้ามีการไหลจากด้านซ้ายไปด้านขวา ค่าที่ผิวเซลล์ e สามารถเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_P + \frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \right] \quad (2.47)$$



ภาพที่ 2.10 ปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ

เมื่อค่า $\theta = 1$ สมการที่ (2.47) จะกลายเป็นสมการของการประมาณค่าในช่วงที่ศูนย์กลางอันดับสอง (central second-order interpolation) ในขณะที่ $\theta = 0$ จะได้สมการของการประมาณค่าต้นลมอันดับสอง ซึ่งโดยทั่วไปสำหรับวิธีการประมาณค่าแบบ QUICK นั้นจะกำหนดให้ $\theta = 1/8$

2.2.17 ลำดับขั้นการคำนวณหาค่าตอบแบบ SIMPLE

กระบวนการวิธี SIMPLE นั้นมีชื่อเต็มว่า Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation โดย Patankar and Spalding (1972) เป็นผู้นำเสนอวิธีนี้เป็นคนแรก วิธีนี้เป็นการใช้ขั้นตอนการเตาและการแก้ไขค่าในการคำนวณหาความดันในระบบพิกัดแบบกริดเยื้อง (Staggered grid)

กระบวนการวิธีแบบ SIMPLE นั้น เริ่มต้นจากการเตาค่าสนามความดัน p^* ตลอดทั้งโดเมนการไหล จากนั้นเราจะทำการหาค่าตอบของสมการแปลงรูปโมเมนตัมโดยใช้ความดันที่เตาขึ้น เพื่อให้ได้ค่าของความเร็ว u^* และ v^* โดยกระบวนการทำซ้ำ ดังนั้นหากมีประมาณสเกลลาร์อื่นใดที่ผูกติดอยู่กับสมการโมเมนตัม ก็จำเป็นต้องทำการคำนวณเป็นลำดับ และวนกลับมาทำการคำนวณซ้ำอีกจนกระทั่งค่าตอบทั้งหมดลู่เข้า

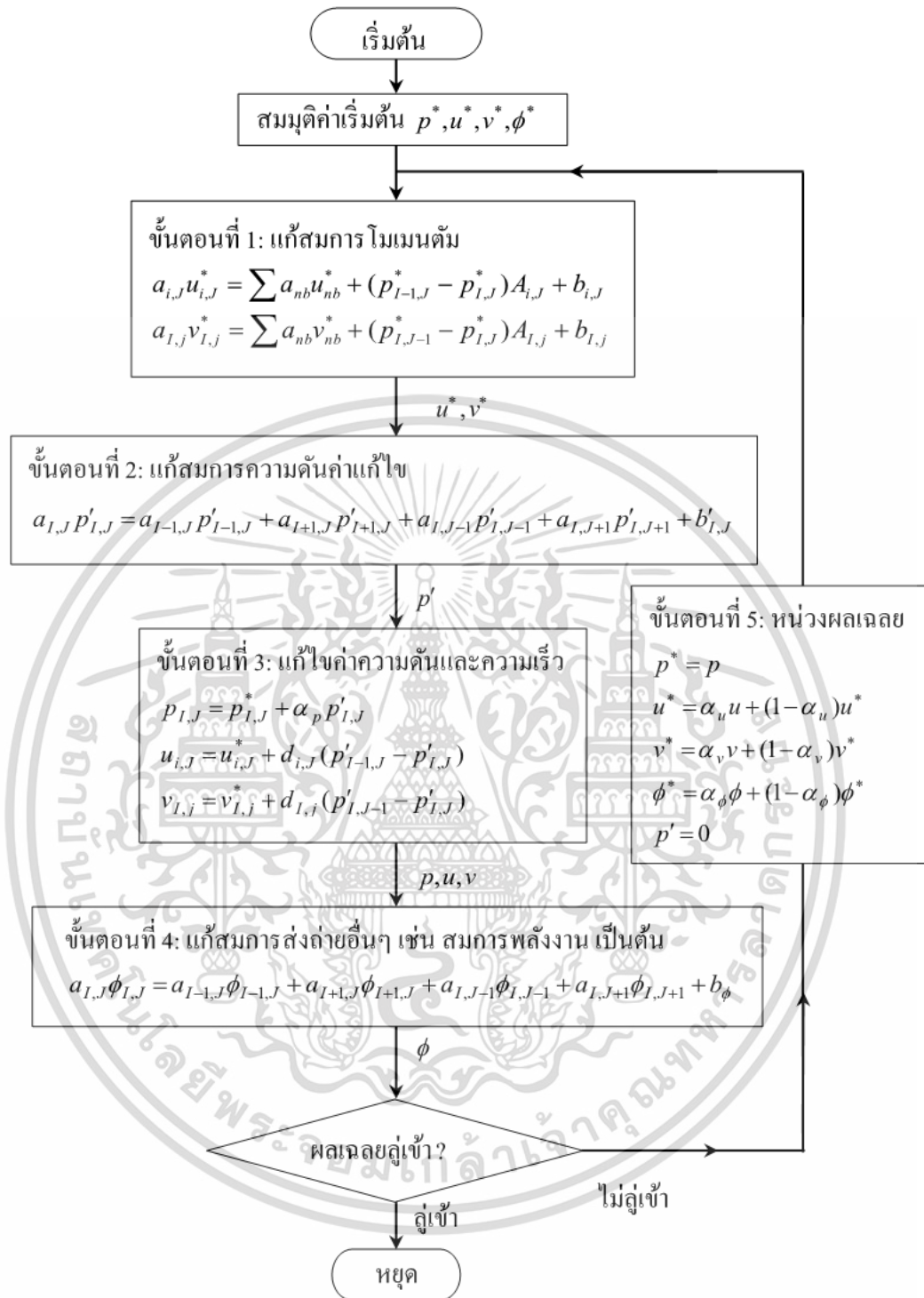
ภาพที่ 2.11 แสดงขั้นตอนวิธี SIMPLE ที่ใช้สำหรับแก้หาค่าความดันและความเร็วในระบบการไหล ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1. สมมุติค่าความเร็ว ความดัน และตัวแปรอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ ให้กับสนามการไหล ค่าความเร็วดังกล่าว จะถูกใช้เป็นตัวเริ่มต้นและใช้คำนวณหาค่าฟลักซ์การพา F ในพจน์สัมประสิทธิ์ของสมการโมเมนตัม
2. แก้สมการโมเมนตัมเพื่อให้ได้ค่าความเร็วในสนามการไหล

3. แก๊สสมการความดันค่าแก๊สเพื่อให้ได้ค่าสำหรับนำไปแก๊สความดันและความเร็ว โดยความเร็วที่ได้ จากขั้นตอนที่ 2 จะถูกนำไปคำนวณหาความไม่สมดุลมวลซึ่งจะถูกใช้เป็นพจน์ซอสในสมการ
4. แก๊สสมการส่งถ่ายสำหรับตัวแปรอื่น (ถ้ามี) เช่น สมการพลังงานในรูปตัวแปรอุณหภูมิ สมการสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วน เป็นต้น
5. ตรวจสอบการลู่เข้าสู่คำตอบ
6. หากคำตอบยังไม่ลู่เข้าให้ทำการห้วงผลเฉลยเพื่อสร้างเสถียรภาพให้กับการคำนวณ จากนั้นนำค่า แทนเป็นค่าเริ่มต้นสำหรับคำนวณซ้ำในรอบถัดไป
7. การคำนวณจะดำเนินตามขั้นตอนที่ 1-6 จนกระทั่งได้ผลเฉลยที่ลู่เข้าสู่คำตอบตามเงื่อนไขที่ต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 ลำดับขั้นตอนการคำนวณวิธี SIMPLE

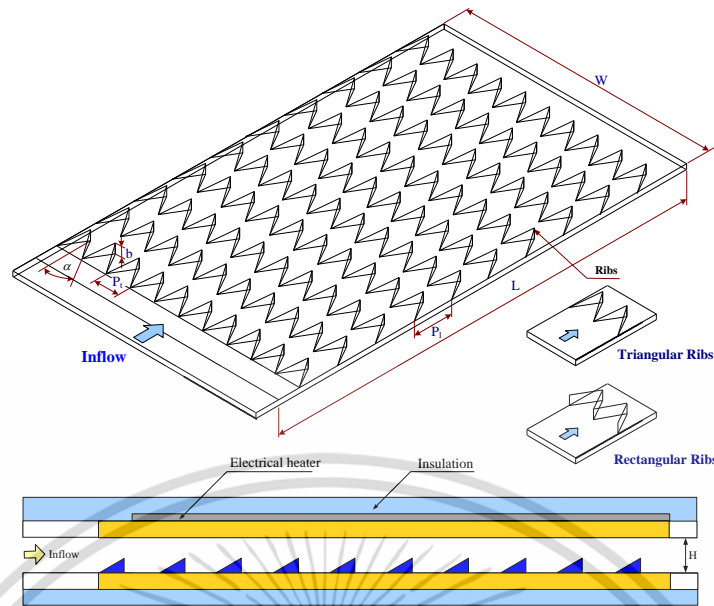
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

กิตติชัย ดวงตาดำ (2555) ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยการสอดใส่แผ่นเจาะรูติดครีบบรูปตัววีโดยการติดครีบบแบบปลายวี (V-tip) ซี่ตามกระแสการไหล และครีบบแบบปลายวีชี้ทวนกระแสการไหล การศึกษาจะเน้นถึงอิทธิพลของทิศทางการวางครีบบ ความสูง ระยะพิตช์ และมุมปะทะ โดยครีบบที่ใช้จะมีอัตราส่วนบล็อก คือ 0.1, 0.2 และ 0.3 อัตราส่วนพิตช์ คือ 1, 2 และ 3 และมุมปะทะ คือ 20° , 30° และ 45° ผลการทดลองพบว่าแผ่นเจาะรูติดครีบบแบบซี่ตามกระแสการไหล ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันสูงกว่าแบบชี้ทวนกระแสการไหล และให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน สูงกว่าเช่นกัน โดยแผ่นเจาะรูติดครีบบตัววีที่ $\alpha = 45^\circ$, $BR = 0.3$ และ $PR = 1$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับครีบบตัววีแบบอื่น ๆ อย่างไรก็ตามแผ่นติดครีบบตัววีที่ $\alpha = 20^\circ$, $BR = 0.2$ และ $PR = 1$ ให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุดทั้งแบบครีบบชี้ทวนกระแสการไหลและซี่ตามกระแสการไหล แผ่นเจาะรูติดครีบบตัววีที่ $\alpha = 20^\circ$, $BR = 0.2$ และ $PR = 1$ ให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่า $\alpha = 30^\circ$ และ 45° ดังนั้นครีบบแบบซี่ตามกระแสการไหลที่ $\alpha = 20^\circ$, $BR = 0.2$ และ $PR = 1$ ให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุด

จิตรกร กนกนัยการ (2553) ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานภายในช่องขนานโดยติดตั้งครีบบางตัวรูปวี รูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงในรูปที่ 2.12 พิจารณาที่เลขเรย์โนลด์ส์ ตั้งแต่ 5,000 ถึง 25,000 ภายใต้สภาวะพลาจซ์ความร้อนที่ผิวช่องขนานคงที่ พิจารณาครีบบางทำมุมปะทะ เท่ากับ 30° โดยทดลองติดตั้งให้แผ่นครีบบตัววีซี่ตามทิศทางการไหล และเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานภายในช่องขนานโดยติดตั้งครีบบางกับช่องขนานที่มีผนังเรียบ มีอัตราส่วนระยะพิตช์ คือ 1, 2, 3 และ 4 อัตราส่วนบล็อก คือ 0.2, 0.3 และ 0.4 จากผลการทดลองพบว่า ครีบบางตัววีรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ค่า $BR = 0.4$, $PR = 1$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุด ตามด้วยครีบบางตัววีรูปสามเหลี่ยม ที่ค่า $BR = 0.4$, $PR = 1$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อนพบว่า ครีบบางตัววีรูปสามเหลี่ยม ที่ค่า $BR = 0.4$, $PR = 1$ ให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน มากกว่าท่อผนังเรียบ 1.839 เท่าซึ่งเป็นค่าสูงสุด ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน พบว่า ครีบบางตัววีรูปสามเหลี่ยม เหมาะสมที่จะนำไปพิจารณาประยุกต์ใช้กับงานมากที่สุด

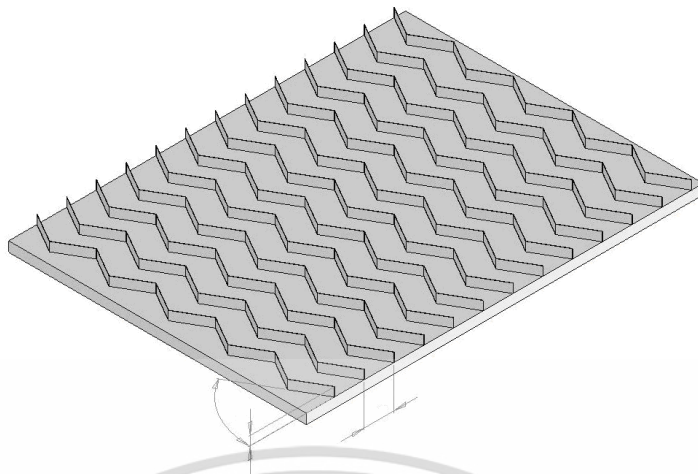


ภาพที่ 2.12 ครีบบางตัววีของ จิตรกร กนกนัยการ (2553)

ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ และสมพล สกุลหลง (2561) ศึกษาและนำเสนออิทธิพลของการใส่แผ่นปีกสามเหลี่ยมในท่อภายใต้สภาวะ พลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ต่อพฤติกรรมทางความร้อนและการต้านทานการไหล ในการทดลองแผ่นปีกสามเหลี่ยมทำมุมปะทะ เท่ากับ 45° ถูกใส่ภายในท่อโดยมีอัตราส่วนบล็อก 3 ค่า คือ 0.1, 0.15 และ 0.2 และอัตราส่วนพิตช์ 3 ค่า คือ 1, 2 และ 3 อากาศถูกใช้เป็นของไหลทดสอบซึ่งไหลผ่านท่อโดยแสดงในพจน์ของเลขเรย์โนลด์ส์ ในช่วง 4,200 ถึง 25,800 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใส่แผ่นปีกสามเหลี่ยมสามารถเพิ่มค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 4.06 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ขณะที่ตัวประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 31.63 เท่า เมื่ออัตราส่วนบล็อก เพิ่มขึ้นส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทาน มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่อัตราส่วนพิตช์ เพิ่มขึ้นการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลง ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของการใส่แผ่นปีกสามเหลี่ยมภายในท่อมีค่าอยู่ในช่วง 1.16–1.51 โดยมีค่าสูงสุดในกรณี $BR = 0.15$ และ $PR = 1$

สมพล สกุลหลง (2551) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนช่องขนานด้วยครีบสามเหลี่ยมและครีบบาง พิจารณาที่เลขเรย์โนลด์ ตั้งแต่ 5,000 ถึง 25,000 ภายใต้สภาวะพลักซ์ความร้อนที่ผิวช่องขนานคงที่ ครีบทำมุมปะทะ 60° , 45° , 30° และครีบตรง (90°) อัตราส่วนพิตช์ คือ 1, 2 และ 3 อัตราส่วนบล็อก คือ 0.1, 0.2 และ 0.3 แผ่นทดสอบ แสดงในรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.13 แผ่นทดสอบของ สมพล สกูลหลง (2551)

จากการทดลองพบว่าครีบบางทำมุมปะทะ 60° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับช่องขนานที่มีมุมปะทะ 45° , 30° และครีบบางตรง (90°) โดยที่ค่าอัตราส่วนพิตซ์เป็น 1 และอัตราส่วนบล็อก คือ 0.3 ให้ผลการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด การเพิ่มสมรรถนะความร้อนที่สูงที่สุด คือ มุม 30° ที่อัตราส่วนพิตซ์ คือ 1 และอัตราส่วนบล็อก เป็น 0.2 โดยมีค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะความร้อน เฉลี่ยมากกว่าท่อผนังเรียบ 2.05

สมพล สกูลหลงและคณะ (2554) ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดตั้งครีบบางทำมุมปะทะ เท่ากับ 45° โดยมีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วน เท่ากับ 1, 2 และ 3 ทำการทดลองที่สภาวะการถ่ายเทความร้อนที่ผิวคงที่ และความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองถูกปรับให้สอดคล้องกับค่าเลขเรย์โนลด์ส เท่ากับ 4000 ถึง 40,000 โดยนำผลของท่อจัตุรัสที่ติดตั้งครีบบางเปรียบเทียบกับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีผนังเรียบ เพื่อศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในรูปเลขนัสเซลต์ และการสูญเสียความดันในรูปตัวประกอบเสียดทาน จากการทดลองพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งครีบบางที่ $PR = 1$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ตามด้วย $PR = 2, 3$ และท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีผนังเรียบตามลำดับ แต่ค่าตัวประกอบเสียดทานก็เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยครีบบางที่ $PR = 1$ ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด ตามด้วยครีบบางที่ $PR = 2, 3$ และท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีผนังเรียบตามลำดับ

สุริยา โชคเพิ่มพูนและคณะ (2557) ศึกษาอิทธิพลของตัวสร้างความปั่นป่วนแบบปีกรูปตัววีที่มีต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำการทดลองภายใต้ เงื่อนไขสภาวะพลังค์ความร้อนที่ผิว คงที่โดยใช้อากาศเป็นของไหลทำงานในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเลขเรย์โนลด์ส มีค่าระหว่าง 5,300 ถึง 24,000 ปีกรูปตัววีที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะที่แตกต่างกันของมุมปะทะเป็น 30° , 45° และ 60° , อัตราส่วนบล็อกเป็น 0.1 0.15 และ 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอัตราส่วนพิทช์ เป็น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ซึ่งปีกรูปตัววีจะถูกสอดใส่ในท่อช่วงทดสอบโดย ขึ้นงานจะลอยอยู่บริเวณกลางหน้าตัดท่อ ผลการศึกษาของกรณีศึกษาทั้งหมดจะทำการเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ พบว่าการใช้ปีกรูปตัววีช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและทำให้เกิดการสูญเสียความดันที่สูงกว่าท่อผิวเรียบ และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมปะทะ และอัตราส่วนบล็อก และที่อัตราส่วนพิทช์ มีค่าลดลง ภายใต้เงื่อนไขการศึกษานี้ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจากท่อผิวเรียบประมาณ 1.40 - 2.43 เท่า ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน มีค่าอยู่ระหว่าง 1.11 - 1.47 โดยค่าสูงสุดเท่ากับ 1.47 เกิดขึ้นในกรณีการใช้ปีกรูปตัววีที่ $Re = 5,300$, $\alpha = 30^\circ$, $BR = 0.1$ และ $PR = 1.5$

Choi et al. (2002) ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบเสียดทาน ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ภายใต้สภาวะพลั๊กความร้อนที่ผิวท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสคงที่ ติดแนวครีบริปูตัววีที่ผิวท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทดลองให้แนวครีบริปูตัววีทำมุมปะทะ 45° มีทิศทางการไหลและทิศทางการตรงข้ามกับการไหล จากผลการทดลองพบว่า ครีบริปูตัววีทำมุม 45° ที่มีทิศทางการตรงข้ามกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบเสียดทานมากกว่าครีบริปูตัววีที่มีทิศทางการไหล

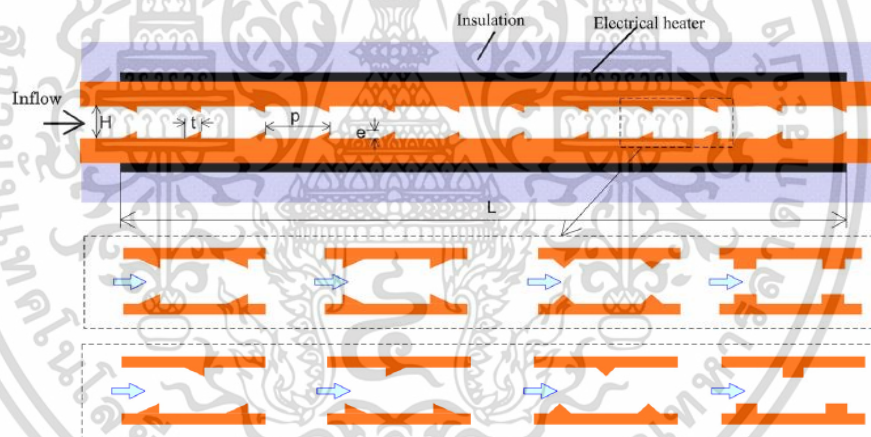
Gao and Sunden (2001) ศึกษาลักษณะการไหลภายในช่องขนานที่แนวติดครีบริปูตัววี โดยพิจารณาที่แนวติดครีบริปูตัววีที่มีทิศทางการไหลและแนวครีบริปูตัววีที่มีทิศทางการตรงข้ามกับการไหล โดยใช้เครื่องมือในการวัดความเร็วภายในช่อง นำมาวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อน และค่าความดันตกคร่อม จากผลการทดลองพบว่า 1.) ครีบริปูตัววีที่มีทิศทางการตรงข้ามกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทานมากกว่าครีบริปูตัววีที่มีทิศทางการไหล 2.) ครีบริปูตัววีที่มีทิศทางการตรงข้ามกับการไหลเหมาะแก่การเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนที่สุด

Promvong and Skullong (2020) บทความนี้แสดงให้เห็นถึงศึกษาอิทธิพลรูปร่างของตัวสร้างกระแสไหลวนปีกรูปตัววี (V-shaped winglet vortex generators, V-WVGs) เมื่อติดตั้งภายในท่อทดสอบ ภายใต้สภาวะอีทพลั๊กคงที่ ในการทดลองนี้ตัวสร้างกระแสไหลวนเป็นปีกรูปตัววีมีสองชนิด ปีกรูปตัววีสี่เหลี่ยม (V-RW) และ ปีกรูปเดลต้า (V-DW) โดยติดตั้งเป็นช่วงเท่าๆ กันของทั้งสองด้านของแผ่นเพลตตรง ก่อนที่สอดใส่เข้าไปภายในท่อด้วยอัตราส่วนพิทช์ 4 ค่า ได้แก่ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 และอัตราส่วนขวางกัน 3 ค่า ได้แก่ 0.10, 0.15, 0.2 โดยกำหนดค่ามุมปะทะที่ 45° องศา ศึกษาโดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบในเงื่อนไขที่สภาวะการไหลปั่นป่วน โดยมีเลขเรย์โนลด์ ช่วงระหว่าง 4130 และ 25,900 จากผลการทดสอบพบว่าผลแสดงให้เห็นว่า ปีกรูปตัววีสี่เหลี่ยม (V-RW) ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่า และ ปีกรูปเดลต้า (V-DW) และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนขวางกัน ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนพิทช์เพิ่มขึ้นให้ผลลัพธ์ที่กลับกัน สำหรับตัวสร้างกระแสไหลวนปีกรูปตัววี (V-shaped winglet vortex generators, V-WVGs) ทั้งสองชนิด ค่าตัว

ประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal enhancement factor, TEF) แบบใหม่ได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บ่งชี้ว่า ปีกรูปเดลต้า (V-DW) ให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal enhancement factor, TEF) อยู่ในช่วง 1.82 – 2.0 หรือประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ที่มากกว่า ปีกรูปตัววีสี่เหลี่ยม (V-RW) โดยมีค่าสูงสุดเมื่อมีอัตราส่วนขวางกั้นที่ 0.15 และอัตราส่วนพิทซ์ที่ 1.0

Promvong and Thianpong (2008) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในหน้าตัดท่อลมขนาดต่าง ๆ ได้แก่ ช่องขนานแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือช่องขนานที่มีอัตราส่วนของรูปทรงของช่องขนานต่ำ ๆ ในการทดลองจะใช้ตัวกลางคือ อากาศ พิจารณาการไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ ตั้งแต่ 5,000 ถึง 16,000 รูปร่างของครีบ ได้แก่ ครีวงกลม วงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือแฉมเฟอร์ และมุมปะทะของครีบ 30° , 45° และ 60° อัตราส่วนบล็อกระหว่าง 0.05, 0.15 และ 0.3 และอัตราส่วนพิทซ์อยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 20 เนื่องจากรูปร่างของครีบของหน้าตัดสามเหลี่ยมมักไม่พบในงานวิจัยบ่อยนัก ดังนั้นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เพื่อเพิ่มเติมของข้อมูลการทดลองครีบบรูปสามเหลี่ยมต่าง ๆ (สามเหลี่ยมหน้าจั่วและสามเหลี่ยมมุมฉาก) จากผลการทดลองพบว่า ผลลัพธ์จากการพิจารณาครีบบรูปสามเหลี่ยมต่าง ๆ (สามเหลี่ยมหน้าจั่วและสามเหลี่ยมมุมฉาก) ทำให้ประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น แสดงในรูปที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 การจัดวางครีบแบบตรงกันและเยื้องกันของ Promvong and Thianpong (2008)

Suriya and Sanhawat (2016) ศึกษาและนำเสนอเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพการระบายความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยครีบบรูปตัววี มุม 45° แบบ V-downstream พิจารณาในช่วงเลขเรย์โนลด์ ตั้งแต่ 4,000 ถึง 26,000 ภายใต้สภาวะพลั๊กความร้อนที่ผิวท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสคงที่ โดยมีอัตราส่วนพิทซ์ 4 ค่า คือ 0.5, 0.75, 1 และ 2 และอัตราส่วนบล็อก 3 ค่า คือ 0.15, 0.2 และ 0.25 ถูกติดตั้งในแนวทแยงมุมภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลขนัสเซลต์,

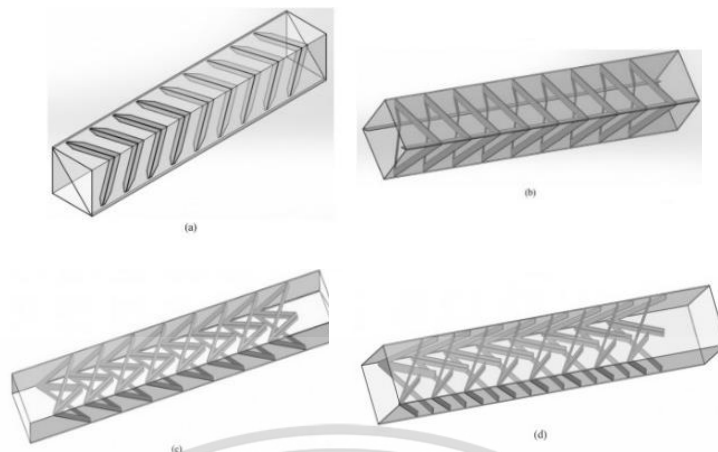
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียแรงดัน ในรูปแบบของตัวประกอบเสียดทาน และประสิทธิภาพเชิงความร้อน จากการทดลองพบว่าแผ่นครีบริบรูปร่างตัววี มุม 45° แบบ V-downstream นั้นให้เลขนัสเซลต์ และ ตัวประกอบเสียดทาน สูงกว่าท่อผิวเรียบ 6.0 ถึง 8.7 และ 37 ถึง 170 ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนประมาณ 1.50–2.06 ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดสำหรับการใช้งานแผ่นครีบริบรูปร่างตัววี มุม 45° แบบ V-downstream คือ 2.06 ที่ $Re = 4100$, $BR = 0.2$ และ $PR = 1.0$

Zhang et al. (1991) ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของครีบริบรูปร่างตัววีมุมปะทะ 45° และ 60° พิจารณาที่เลขเรย์โนลด์ส ตั้งแต่ 15,000 ถึง 90,000 ภายใต้สภาวะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสคงที่ โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่หนึ่ง แนวครีบริบรูปร่างตัววีมุมปะทะ 45° และ 60° มีทิศทางเดียวกับการไหล และรูปแบบที่สอง แนวครีบริบรูปร่างตัววีมุมปะทะ 45° และ 60° มีทิศทางตรงข้ามกับการไหล จากผลการทดลองพบว่า 1.) ครีบริบรูปร่างตัววีมุมปะทะ 60° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมมากกว่าครีบริบรูปร่างตัววีมุมปะทะ 45° 2.) แนวครีบริบรูปร่างตัววีที่มีทิศทางตรงข้ามกับการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความดันตกคร่อมมากกว่าแนวครีบริบรูปร่างตัววีที่มีทิศทางเดียวกับการไหล 3.) ครีบริบรูปร่างตัววีที่มีทิศทางตรงข้ามกับการไหลให้ค่าการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนมากกว่าครีบริบรูปร่างตัววีที่มีทิศทางเดียวกับการไหล

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

วิฑาตา เลขภูรัตน์ชัย (2559) ได้นำเสนอเกี่ยวกับการพาความร้อนแบบบังคับของการไหลแบบปั่นป่วน อัตราการถ่ายเทความร้อน และการปรับปรุงสมรรถนะของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยครีบริบรูปร่างตัววีมุมปะทะ เท่ากับ 0.05, 0.10 และ 0.15 และ ครีบริบรูปร่างตัววีมุมปะทะ เท่ากับ 1 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° จากการทดลองพบว่าผลการคำนวณในรูปของแผนภาพการไหล พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการประเมินประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพท์กับท่อผิวเรียบเมื่อติดตั้งครีบริบ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการรบกวนของชั้นขอบเขตความร้อนเพิ่มมากขึ้น การปรับปรุงอัตราการถ่ายเทความร้อนประมาณ 2.8-6 เท่าซึ่งมีค่าสูงกว่าท่อผิวเรียบนอกจากนี้ผลจากการคำนวณเผยให้เห็นว่าปัจจัยที่เหมาะสมของการเพิ่มตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน อยู่ที่ประมาณ 1.72 ที่อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.10 เลขเรย์โนลด์สมีค่า 3,000 และติดตั้งแผ่นกั้นการไหลรูปร่างตัววีแบบชี้ตรงข้ามกับทิศทางกระแสการไหล



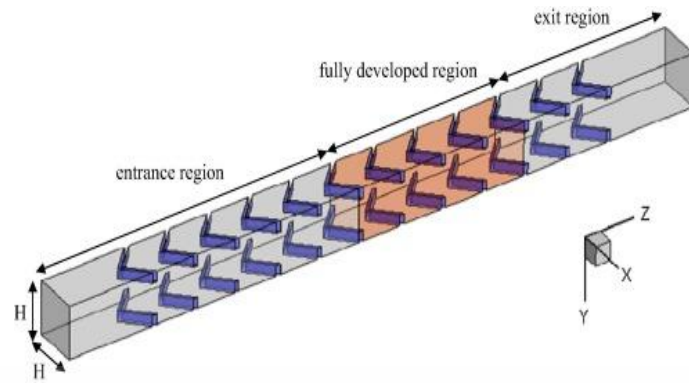
ภาพที่ 2.15 แสดงท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีแผ่นกั้นการไหลในรูปแบบต่าง ๆ

สมบัติ ทำนา (2552) ศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส พิจารณาที่การไหลแบบราบเรียบภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในช่วงเลขเรย์โนลด์ ตั้งแต่ 100 ถึง 1,000 ภายใต้สภาวะพลั๊กความร้อนที่ผิวท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสคงที่ โดยมีการติดตั้งแผ่นกั้นแบบวางขวาง แผ่นกั้นวางเอียง และแผ่นกั้นวางเอียงรูปตัววีที่ผนังทั้งสองด้านของท่อ ซึ่งมีการวางแผ่นกั้นแบบตรงกัน โดยแผ่นกั้นวางเอียงมีลักษณะทำมุมปะทะ คือ 20° , 30° และ 45° และมีค่าอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 พิจารณาการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววี 2 รูปแบบ ได้แก่ ติดตั้งแผ่นกั้นให้ปลายวีชี้ตามทิศทางการไหล และติดตั้งแผ่นกั้นให้ปลายวีชี้ตรงข้ามกับทิศทางการไหล จากผลการทดลองพบว่า 1.) ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นจะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ 2.) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนบล็อกเพิ่มขึ้น พบว่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นที่ค่าเลขนัสเซลต์ เพิ่มขึ้น 3.) ลักษณะติดตั้งของแผ่นกั้นพบว่า แผ่นกั้นวางเอียงรูปตัววีเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแผ่นกั้นวางเอียงและแผ่นกั้นวางขวาง 4.) ติดตั้งแผ่นกั้นให้ปลายวีชี้ตรงข้ามทิศทางการไหลให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการติดตั้งแผ่นกั้นแบบปลายวีชี้ตามทิศทางการไหล 5.) การติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววี

H.E. Fawaz et al. (2018) ศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วนและพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน ภายในท่อสี่เหลี่ยมที่มีแผ่นกั้นการไหลรูปตัววีใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ติดตั้งแผ่นกั้นการไหลแบบชนิดผนังท่อ กำหนดอัตราส่วนบล็อกการไหล (BR เท่ากับ 0.2, 0.4 และ 0.6) และอัตราส่วนพิตช์ (PR) เท่ากับ 0.5, 1 และ 1.5) เพื่อหาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อน ซึ่งแผ่นกั้นการไหลรูปตัววีชี้สวนกระแสการไหล พบว่าเมื่ออัตราส่วนบล็อกการไหล (BR) สูงขึ้น หรืออัตราส่วนพิตช์ (PR) ลดลง จะส่งผลให้เลขนัสเซลต์มีค่าสูงขึ้น โดยกรณี BR เท่ากับ 0.2 ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 0.78 ที่ค่าเรย์โนลด์ต่ำกว่า 5,000 นอกจากนี้ค่า

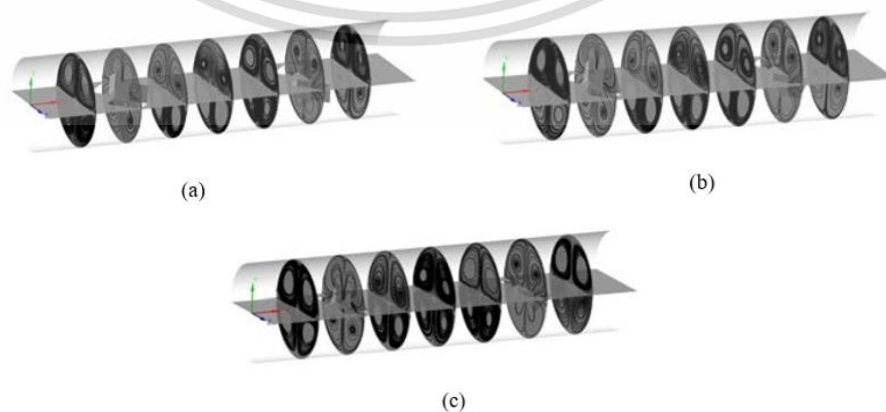
อัตราส่วนพิตช์ต่ำ (PR เท่ากับ 0.5) จะทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 แสดงรูปทรงของท่อรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีแผ่นกั้นการไหลรูปตัววี

Sripattanapipat et al. (2016) ศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมในสภาวะพลักซ์ความร้อนคงที่ ด้วยการติดตั้ง winglet vortex โดยมีอากาศเป็นของไหลภายในท่อทดสอบ ภายใต้เลขเรย์โนลด์ ระหว่าง 4,000 ถึง 20,000 ศึกษาเชิงตัวเลขของ rectangular-winglet tape (RWT) โดยวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ trapezoidal-winglet tape (TWT) และ delta-winglet tape (DWT) โดยพิจารณา RWT ภายใต้พารามิเตอร์อัตราส่วนบล็อก ($BR = 0.1, 0.15, 0.2$ และ 0.25) ในขณะที่ TWT และ DWT พิจารณาภายใต้พารามิเตอร์อัตราส่วนบล็อก $BR = 0.2$ เท่านั้น และมีครีบทั้งหมดมุมปะทะ 45° และอัตราส่วนพิทช์ ($PR = 4$) ผลลัพธ์ที่เป็นตัวเลขแสดงให้เห็นว่าค่าการถ่ายเทความร้อน และค่าตัวประกอบเสียดทานของครีบบั้ค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนบล็อกเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับการปรับปรุงค่าของอัตราส่วนบล็อก และมีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 1.8-2.7 เท่าเมื่อเทียบกับค่าการถ่ายเทความร้อนของท่อผิวเรียบ ในขณะที่ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็น 4.5-11 เท่าเมื่อเทียบกับค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบสำหรับช่วง BR ที่ศึกษาที่ให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนสูงสุด คือ 1.48 สำหรับครีบแบบ RWT ด้วย $BR = 0.1$ ที่เลขเรย์โนลด์ที่ต่ำ



ภาพที่ 2.17 ลักษณะรูปแบบการไหลของ Sripattanapipat et al. (2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ของชุดทดลอง และการหาความเหมาะสมของแบบจำลองเชิงตัวเลข ตลอดจนขั้นตอนการศึกษา การเก็บข้อมูล และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องของค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อผิวเรียบ ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมและความน่าเชื่อถือของงานวิจัยนี้ เพื่อใช้หาค่าการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอากาศไหลผ่านปีกรูปตัววีภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

3.2 การออกแบบอุปกรณ์และชุดทดลอง

3.2.1 ท่อทางเข้าชุดทดลอง

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ $Re \leq 2,300$ ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัว หาได้จากสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6)

$$L_{h,laminar} \approx 0.05 Re D_h \quad (2.5)$$

$$L_{t,laminar} \approx 0.05 Re Pr D_h = Pr L_{h,laminar} \quad (2.6)$$

เลขเรย์โนลด์ส์วิกฤต สำหรับการเปลี่ยนแปลงของการไหลจากแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re \approx 2,300$ และการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ เมื่อ $Re \geq 4,000$

ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วน $Re \geq 4,000$ ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับเลขเรย์โนลด์และมีค่าประมาณดังสมการที่ (2.7)

$$L_{h,turbulent} \approx L_{t,turbulent} \approx 10 D_h \quad (2.7)$$

$$L_h = L_t = 10 D_h = 10 \times 0.045 = 0.45 \text{ m}$$

ดังนั้นในการทดลองจึงกำหนดท่อทางเข้าชุดทดลองให้มีความยาว 1.4 เมตร

ในการทดลองชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถแบ่งขั้นตอนการทดลอง ออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่หนึ่ง	การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง
ขั้นตอนที่สอง	การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง
ขั้นตอนที่สาม	ขั้นตอนการทดลองและเก็บผลการทดลอง

3.2.2 เครื่องปั๊มลม

กำหนดขนาดพัดลมโดยพิจารณาที่เลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 26,000 ซึ่งเป็นการทำงานของพัดลมในช่วงรับภาระสูงสุด

จากสมการเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก สมการที่ (2.3)

$$D_h = \frac{4A_c}{p} = \frac{4a^2}{4a} = a \quad (2.3)$$

$$D_h = 0.045 \text{ m}$$

เมื่อ a คือ ความกว้างของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส จากตารางคุณสมบัติอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 300 K จะได้ $\rho = 1.099712 \text{ kg/m}^3$ และ $\mu = 191.3993 \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$

จากสมการเลขเรย์โนลด์ สมการที่ (2.1)

$$\text{Re} = \frac{V_{avg} D_h}{\nu} = \frac{\rho V_{avg} D_h}{\mu} \quad (2.1)$$

สามารถหาความเร็วเฉลี่ยได้จาก

$$\begin{aligned} V_{avg} &= \frac{\text{Re} \mu}{\rho D_h} \\ &= \frac{26,000 \times 191.3993 \times 10^{-7}}{1.099712 \times 0.045} \\ &= 10.06 \text{ m/s} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.9)

$$\begin{aligned} \dot{V} &= V_{avg} A_c \\ &= 10.06 \times 0.045 \times 0.045 \\ &= 0.0204 \text{ m}^3/\text{s} = 1.222 \text{ m}^3/\text{min} \end{aligned} \quad (2.9)$$

ดังนั้นในการทดลองนี้ กำหนดให้ใช้พัดลมที่สามารถให้ค่าอัตราการไหลมากกว่า 1.22

ลูกบาศก์เมตรต่อนาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

ในการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลหลักต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีแผ่นปีกรูปตัววีเพื่อนำค่ามาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ ซึ่งเป็นงานวิจัยเชิงการทดลอง ดังนั้นการเตรียมชุดทดลองและอุปกรณ์ในการทดลอง มีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

3.3.1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลของของไหลภายในท่อที่ติดตั้งปีกรูปตัววีกับกรณีท่อที่ไม่มีเรียบ ภายใต้เงื่อนไขการไหลแบบการไหลปั่นป่วน ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีหน้าตัดขนาด 45×45 มิลลิเมตร ซึ่งผนังของชุดทดลองจะประกอบไปด้วยฉนวน 3 ชั้น โดยฉนวน 2 ชั้นแรกใช้วัสดุเป็นฉนวนใยแก้ว และชั้นที่สามหุ้มด้วย Aero flex ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

3.3.2 Supply Air

ภาพที่ 3.2 แสดงแหล่งจ่ายอากาศ คือพัดลมแรงดันสูง (High-pressure blower) ขนาดแบบหอยโข่งรุ่น TB-150 ซึ่งมี 12 ใบพัด, ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ หรือ 2 แรงม้า และมีความดัน 77 มิลลิเมตรน้ำ



ภาพที่ 3.2 พัดลมหอยโข่งแรงดันสูง (Blower รุ่น TB-150)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ไฟฟ้า (Motor) ถูกใช้เป็นตัวต้นกำลังในการขับเคลื่อนพัดลมหอยโข่งแรงดันสูง โดยใช้กระแสไฟฟ้า 14.8 A, 380 V, 3 PHASES, 50 Hz, 2900 rpm ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 มอเตอร์ไฟฟ้า (Motor)

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) รุ่น ND1-4-5A5 ดังภาพที่ 3.4 ถูกใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เป็นตัวต้นกำลังในการขับเคลื่อนพัดลมหอยโข่งแรงดันสูง เพื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศภายในชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้ได้ตามที่กำหนด ใช้กระแสไฟฟ้า 380V 3PHASES



ภาพที่ 3.4 อินเวอร์เตอร์ (Inverter รุ่น ND1-4-5A5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

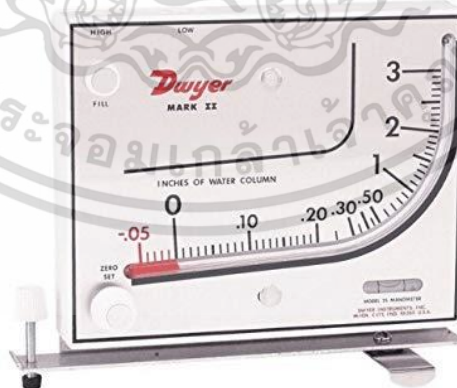
3.3.5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

Orifice meter ดังภาพที่ 3.7 เป็นอุปกรณ์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศ โดยติดตั้งที่บริเวณทางเข้าของชุดทดลองระหว่างพัดลมและถังพักลม เพื่อวัดอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าของชุดทดลอง ซึ่ง Orifice meter ถูกสร้างตามมาตรฐานของ JIS (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD) Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes JIS Z 8762



ภาพที่ 3.7 Orifice meter

ภาพที่ 3.8 แสดงเครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer) รุ่น Mark II Model No.25 เป็นอุปกรณ์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศโดยวัดจากความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลัง Orifice meter สามารถอ่านค่าได้จากระดับของ red gage oil (specific gravity = 0.826)



ภาพที่ 3.8 เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

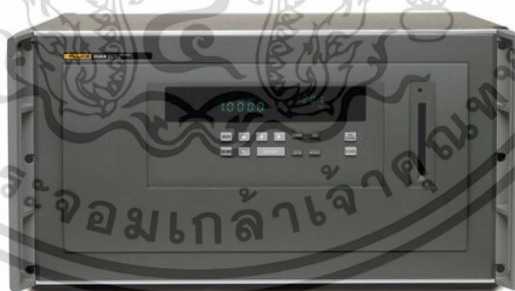
3.3.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

Data Logger SUPCON ดังภาพที่ 3.9 เป็นอุปกรณ์แสดงอุณหภูมิของอากาศบริเวณทางเข้าและทางออกของช่วงทดลอง



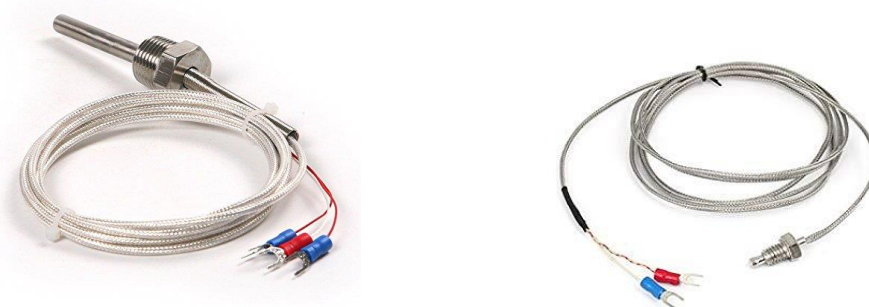
ภาพที่ 3.9 Data Logger SUPCON

ภาพที่ 3.10 แสดง Data Acquisition System รุ่น Fluke 2650A เป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Recorder) โดยส่งสัญญาณแสดงผลมายังคอมพิวเตอร์ผ่านทาง Software สามารถแสดงค่าอุณหภูมิได้ทั้งหมด 40 ค่า ความละเอียดของค่าอุณหภูมิมิติทศนิยม 6 ตำแหน่ง ใช้งานโดยเชื่อมต่ออุปกรณ์กับข้อมูลเข้ากับเทอร์โมคัปเปิล เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวด้านบนและด้านข้างของผิวท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสทั้งหมด 22 ตำแหน่ง



ภาพที่ 3.10 Data acquisition system รุ่น Fluke 2650A

เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิผิวครีบ อุณหภูมิทางเข้า และอุณหภูมิทางออกของช่วงทดสอบ ดังภาพที่ 3.11 โดยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 22 ตัว เพื่อวัดอุณหภูมิผิวทั้งหมด 22 ตำแหน่งและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิชนิด RTD Pt100 จำนวน 2 ตัว เพื่อวัดอุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกของช่วงทดสอบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



RTD Pt100

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) แบบชนิด K

ภาพที่ 3.11 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor)

3.3.7 อุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม (Differential pressure gages)

เครื่องวัดความดันตกคร่อม (Differential pressure gages) รุ่น Dwyer 475 Mark III Digital Manometer ช่วงการใช้งาน 0-10.00 IN W.C. (0-2.49 kPa) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันตกคร่อมภายในช่วงทดสอบ ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 เครื่องวัดความดันตกคร่อม (Differential pressure gages)

3.3.8 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ

เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (Vane-type Anemometer) รุ่น TESTO 445 ดังภาพที่ 3.13 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วของอากาศบริเวณทางออกของชุดทดลอง ใช้ในการสอบเทียบ (Calibration) ความเร็วลมในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

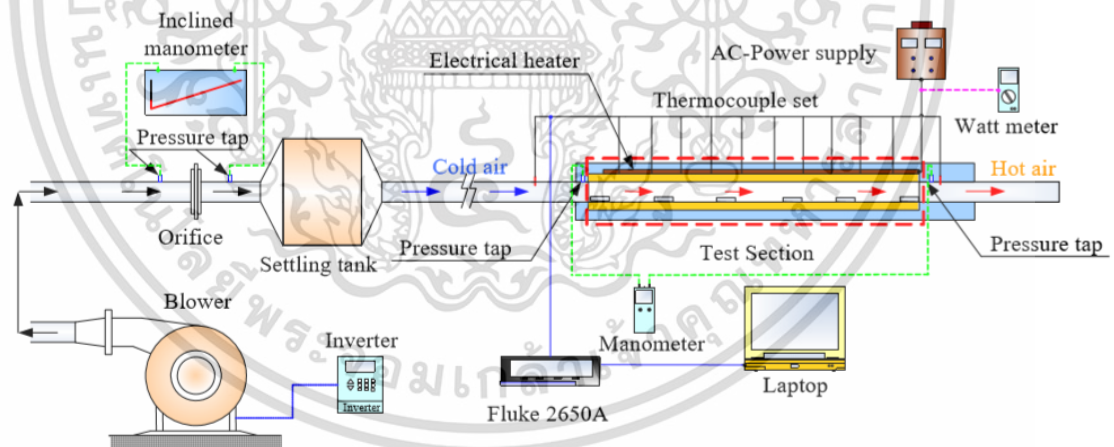


ภาพที่ 3.13 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (Vane-type Anemometer) รุ่น TESTO 445

3.4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

3.4.1 อุปกรณ์ชุดทดลอง

ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววี และอุปกรณ์การทดลองต่าง ๆ แสดงในรูปภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 แผนผังของชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

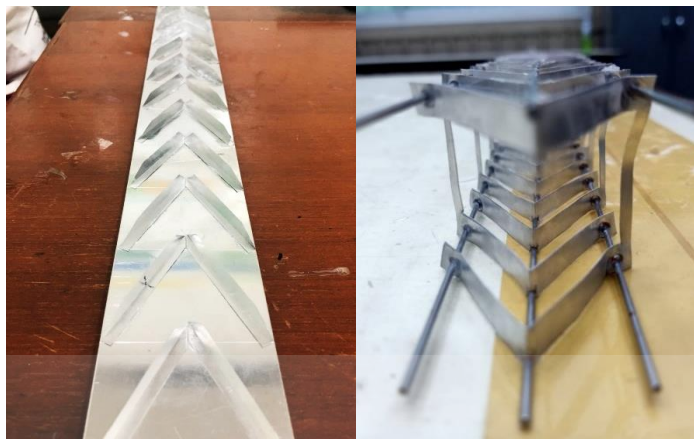
ของไหลที่ใช้ในการทดสอบในส่วนของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน คือ อากาศ โดยถูกส่งตรงเข้าสู่ระบบด้วยพัดลมหอยโข่งแรงดันสูง (High-pressure blower) ขนาด 1.5 kW และขนาดท่อของท่อกลมที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างพัดลมหอยโข่งแรงดันสูง (High-pressure blower) และถังพักลม (Settling tank) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50 มิลลิเมตร มีอินเวอร์เตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Inverter) ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงานของพัดลมหอยโข่งแรงดันสูง (High-pressure blower) ให้ได้อัตราการไหลของอากาศตามที่ต้องการ อัตราการไหลของอากาศในระบบถูกวัดโดยใช้แผ่นออริฟิสที่ผ่านการสอบเทียบ (Calibration) อาศัยหลักการความดันตกคร่อมออริฟิส ซึ่งวัดโดยเครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer)

ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้างและความสูงของท่อ 45×45 มิลลิเมตร ความยาวของท่อ 3 เมตร, ความหนาของท่อ 3 มิลลิเมตร, ส่วนทดสอบมีความยาว (L) 1 เมตร, พัดลมหอยโข่งแรงดันสูง (High-pressure blower) ขนาด 1.5 kW เป็นแหล่งกำเนิดการไหลของอากาศ, Orifice meter ใช้เป็นอุปกรณ์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศที่บริเวณทางเข้าของชุดทดสอบ, เครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer) ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศโดยอาศัยหลักการจากความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลัง Orifice meter โดยอ่านค่าจากระดับน้ำของเครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer), ถังพักลม (Settling tank) มีหน้าที่การทำให้ของไหลเกิดการปั่นป่วนน้อยที่สุดก่อนเข้าสู่เข้าบริเวณช่วงทดสอบ, ช่องขนานปรับสภาพการไหล เพื่อให้ของไหลก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบมีคุณสมบัติเป็นของไหลที่ปรับตัวแล้ว (Fully develop), ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3,000 วัตต์ ติดตั้งบริเวณผนังของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสบริเวณช่วงทดสอบ ควบคุมแรงดันที่ให้กับแผ่นฮีตเตอร์เพื่อควบคุมฟลักซ์ความร้อนให้ได้ตามที่กำหนด, Data Logger SUPCON เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลอุณหภูมิบริเวณทางเข้าและทางออกของช่วงทดสอบ โดยเชื่อมต่อข้อมูลมาจาก RTD Pt100, Data Acquisition System เป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิผิว 22 ตำแหน่ง ในบริเวณช่วงทดสอบ โดยส่งสัญญาณแสดงผลมายังคอมพิวเตอร์ผ่านทาง Software ใช้งานโดยเชื่อมต่ออุปกรณ์กับข้อมูลเข้ากับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K, เครื่องวัดความดันตกคร่อม (Differential pressure gages) ใช้วัดความดันตกคร่อมระหว่างตำแหน่งทางเข้าและทางออกของช่วงทดสอบ โดยส่วนทดสอบต้องมีการหุ้มฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนภายในส่วนทดสอบออกสู่บรรยากาศภายนอก

3.4.2 อุปกรณ์ติดตั้งในชุดทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบมี 2 ลักษณะการติดตั้ง คือ แบบเป็นแผ่นอลูมิเนียมตรงมีแผ่นปีกรูปตัววี ถูกติดตั้งตามแนวยาวของแผ่นอลูมิเนียมตรง ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบในแนวเส้นทแยงมุมของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแบบโครงลวดยึดปีกรูปตัววีโดยติดตั้งอุปกรณ์ทดลองให้ปีกรูปตัววีชิดผิวท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งทิศทางของกระแสการไหลที่พิจารณา คือ กรณีแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) และแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) โดยมีรูปร่างของแผ่นปีกรูปตัววีเป็นแบบสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมู สี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็ม สี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวตัด และสามเหลี่ยม ซึ่งมีอัตราส่วนพิชเท่ากับ 0.5, 1.0 อัตราส่วนบล็อกเท่ากับ 0.15, 0.2, 0.25 ทำมุมปะทะเท่ากับ 30 และ 45 องศา



ภาพที่ 3.15 ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.5 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งชิ้นงานทดสอบภายในชุดทดสอบ
2. เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลมหอยโข่งแรงดันสูง (High-pressure blower) ให้อากาศไหลผ่านชุดทดสอบ และปรับอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อปรับความเร็วรอบของพัดลมหอยโข่งแรงดันสูง (High-pressure blower) เพื่อให้ได้อัตราการไหลของอากาศตามที่ออกแบบ โดยดูอัตราการไหลของอากาศในระบบจากการอ่านค่าความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิสิกจากเครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (Inclined manometer)
3. วัดค่าความดันตกคร่อมของส่วนทดสอบ บันทึกผลความดันตกคร่อมที่ความเร็วลมต่าง ๆ ตามที่ออกแบบ
4. เปิดเครื่องควบคุมฟลักซ์ความร้อนของแผ่นฮีตเตอร์ ปรับค่าความต่างศักย์แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับจ่ายไฟให้กับแผ่นฮีตเตอร์ โดยให้ความร้อนกับผิวท่อด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่
5. สังเกตอุณหภูมิของผิวท่อที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อมีอุณหภูมิกิ่งที่แล้ว ทำการบันทึกผลอุณหภูมิผิวทดสอบ อุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกของส่วนทดสอบ
6. ปรับความเร็วลมตามค่าที่ออกแบบไว้จนครบทั้ง 11 ระดับ โดยเลขเรย์โนลด์ส์จะอยู่ระหว่าง 4,000 ถึง 26,000 แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 5
7. ทำการเปลี่ยนชิ้นงานทดสอบภายในชุดทดลอง แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 2 ถึง 6 ตามลำดับ เพื่อเก็บผลความดันตกคร่อมของส่วนทดสอบ อุณหภูมิผิวทดสอบ อุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกของส่วนทดสอบ
8. วิเคราะห์ข้อมูลของค่าการสูญเสียความดันซึ่งอยู่ในรูปของตัวประกอบเสียดทาน ค่าการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของเลขนีสเซิลต์ และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

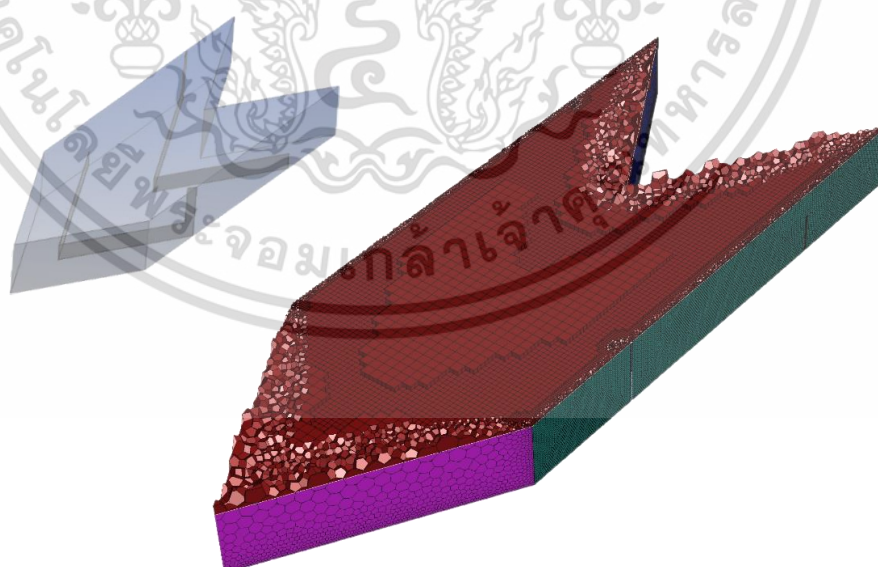
3.6 เงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณแบบจำลองเชิงตัวเลข

สำหรับการคำนวณการไหลใน 3 มิติ ได้ใช้ค่าเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

1. สภาวะทางเข้าและทางออกเป็นแบบ Periodic Translation ที่มีอากาศไหลเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ และมีค่าเลขพรันด์เทิล (Pr) คงที่ เท่ากับ 0.707
2. รูปร่างความเร็วของทางเข้าและทางออกมีลักษณะเหมือนกัน
3. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผนัง ให้ความเร็วมีค่าเท่ากับศูนย์ (No slip condition) และเป็นผนังที่อยู่กับที่ (Stationary wall)
4. กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนของปีกรูปตัววีมีค่าเท่ากับศูนย์
5. กำหนดให้ผนังทุกด้านของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่ มีค่า 600 W/m^2

3.7 การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์

การตรวจสอบความเป็นอิสระของผลเฉลยจากจำนวนกริดเซลล์โดยมีช่องทางการไหลทดสอบที่ติดตั้งปีกรูปตัววีติดบนผิวของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความกว้าง 45 มิลลิเมตร ซึ่งปีกรูปตัววีมีอัตราส่วนบล็อก (BR) เท่ากับ 0.15 และมีอัตราส่วนพิทช์ (PR) เท่ากับ 1 ทำมุมปะทะการไหล (α) 30 องศา จัดวางปีกรูปตัววีแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) โดยพิจารณาการไหลแบบเป็นคาบ (periodic) ซึ่งคำนวณการไหลในช่วงพัฒนาอย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง หรืออาจเรียกว่าการคำนวณแบบเป็นโมดูล และมีโดเมนการไหลแบบสมมาตร (symmetry planes) ดังภาพที่ 3.16

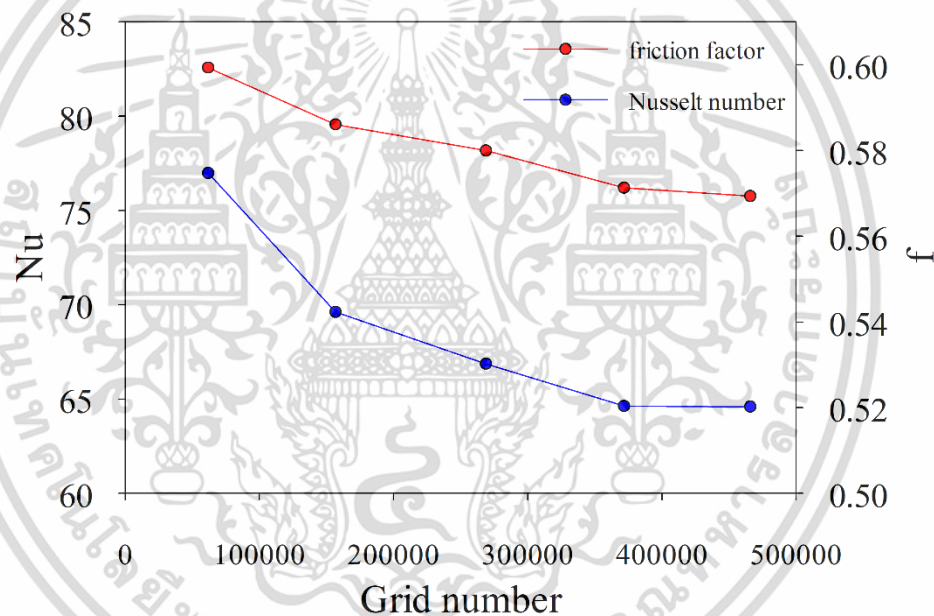


ภาพที่ 3.16 รูปร่างกริดเซลล์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการติดตั้งปีกรูปตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กริดที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นแบบทรงหกหน้าและทรงสี่หน้า แบ่งกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (non-uniform grid) ซึ่งจะพิจารณาบริเวณผนังให้มีจำนวนกริดหนาแน่น และบริเวณที่ห่างออกไปจากผนังก็จะมีจำนวนกริดเบาบางลง ส่วนการหาผลกระทบของจำนวนกริดที่มีผลต่อผลเฉลย ได้ทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณของกริดที่ต่างกัน ที่จำนวนประมาณ 61,700, 157,000, 269,000, 372,000 และ 466,000 โดยใช้ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE และใช้แบบแผนการคำนวณแบบ QUICK โดยมีเงื่อนไขขอบเขตตั้งหัวข้อที่ 3.6 และมีเงื่อนไขการลู่เข้าของการหาคำตอบสำหรับสมการพลังงานเป็น 10^{-9} และมีค่าเป็น 10^{-5} สำหรับค่าอื่น ๆ

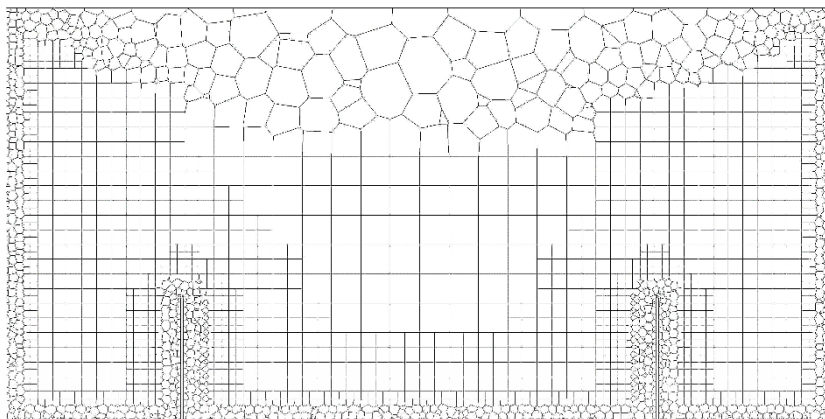
พบว่าเมื่อจำนวนกริดเพิ่มขึ้นจาก 371,800 เป็น 465,800 ตัวประกอบเสียดทาน (f) มีความคลาดเคลื่อน 0.34% และเลขนัสเซิลต์ (Nu) มีความคลาดเคลื่อน 0.07% ดังภาพที่ 3.17 ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของกริดที่ 371,800 เพื่อใช้ในการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้



ภาพที่ 3.17 อิทธิพลของจำนวนกริดเซลล์ต่อค่า Nu และ f ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,150$

3.8 การตรวจสอบความละเอียดของกริดเซลล์บริเวณใกล้ผนังท่อ

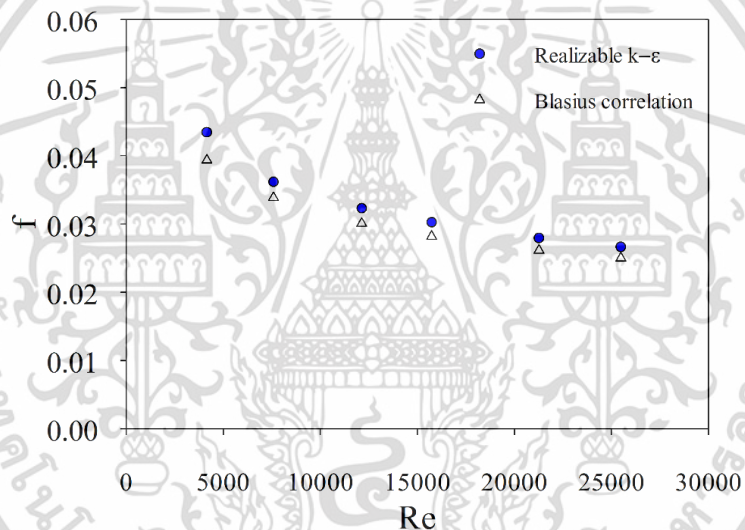
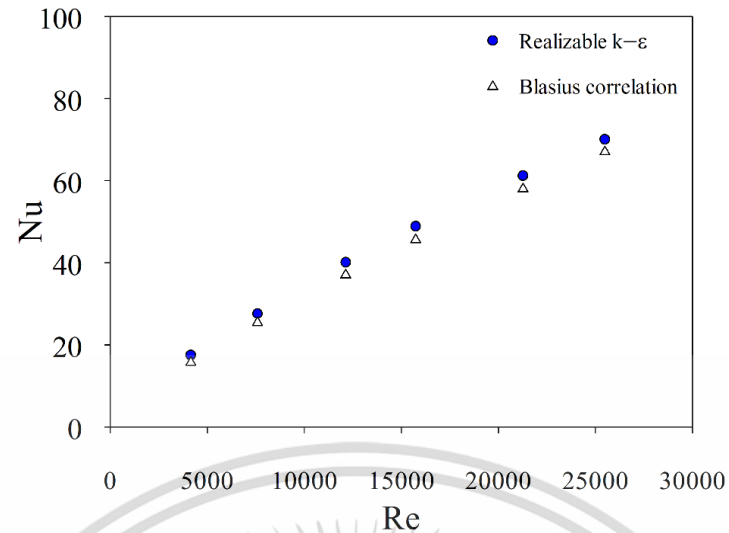
จากหัวข้อที่ 2.2.12 จำเป็นต้องตรวจสอบค่าความละเอียดของกริดเซลล์บริเวณใกล้ผนังซึ่งแสดงไว้ในค่า y^+ โดยใช้แบบจำลองในภาพที่ 3.16 พบว่าแบบจำลองที่มีความละเอียดของกริดเซลล์บริเวณใกล้ผนังน้อย ๆ จะส่งผลให้ค่า y^+ มีค่าสูง ส่วนแบบจำลองที่มีความละเอียดของกริดเซลล์ที่บริเวณผนังมาก ๆ จะส่งผลให้ค่า y^+ มีค่าต่ำ ภาพที่ 3.18 แบบจำลองมีค่า y^+ อยู่ในช่วง 0.0211 ถึง 2.938 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อไป



ภาพที่ 3.18 ความละเอียดของกริดเซลล์

3.9 การตรวจสอบแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองการไหลในท่อเรียบ

Janthong et al. (2019) ได้เสนอการเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k-\epsilon$ และ RNG $k-\epsilon$ พบว่า แบบจำลองปั่นป่วน Realizable $k-\epsilon$ ให้ผลของเลขนัสเซิลท์ (Nu) และตัวประกอบเสียดทาน (f) ใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Tamna et al. (2014) มากกว่า และ Promthaisong (2013) ได้เปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k-\epsilon$ และ SST $k-\omega$ พบว่า แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k-\epsilon$ ให้ผลของเลขนัสเซิลท์ (Nu) และตัวประกอบเสียดทาน (f) สอดคล้องกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และ Blasius มากกว่า ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองแบบ Realizable $k-\epsilon$ ในการศึกษา การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วนใช้จำนวนกริดเซลล์ที่ได้จากการตรวจสอบความเป็นอิสระในหัวข้อ 3.7 สำหรับการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ



ภาพที่ 3.19 การตรวจสอบความถูกต้องของตรงผิวเรียบสำหรับ (ก) การถ่ายเทความร้อน และ (ข) ตัวประกอบเสียดทาน

ในภาพที่ 3.19 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Realizable $k-\epsilon$ สอดคล้องกันดีกับสมการสหสัมพันธ์ของ Blasius และ Dittus-Boelter โดยความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของตัวประกอบเสียดทาน (f) และเลขนัสเซลล์ต์ (Nu) มีค่าเป็น 7.55% และ 7.64% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

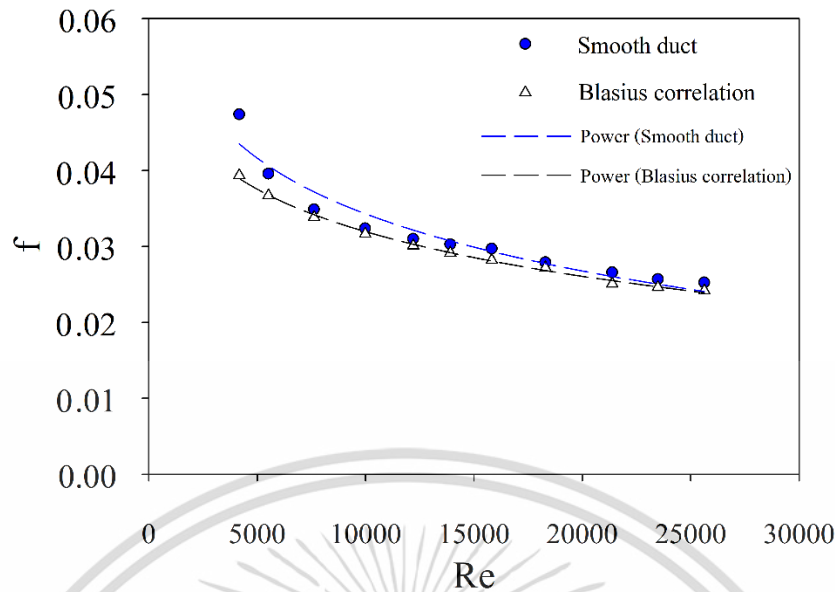
4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงกล่าวถึงผลการทดลองการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีตามแนวเส้นทแยงมุมของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส และติดตั้งอุปกรณ์ทดลองให้ชนิดผิวท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยกรณีกระแสการไหลที่พิจารณา คือ กรณีแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) และแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) สามารถแยกการวิเคราะห์การทดลองได้เป็น 2 ส่วน ซึ่งแสดงในรูปแบบตัวแปรไร้มิติ ได้แก่ การวิเคราะห์ผลการสูญเสียความดันโดยแสดงอยู่ในรูปของตัวประกอบเสียดทานและการวิเคราะห์ผลของการถ่ายเทความร้อนโดยแสดงอยู่ในรูปของเลขนัสเซลต์ รวมถึงการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ดังต่อไปนี้

4.2 การทดสอบท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ

4.2.1 ตัวประกอบเสียดทาน (friction factor)

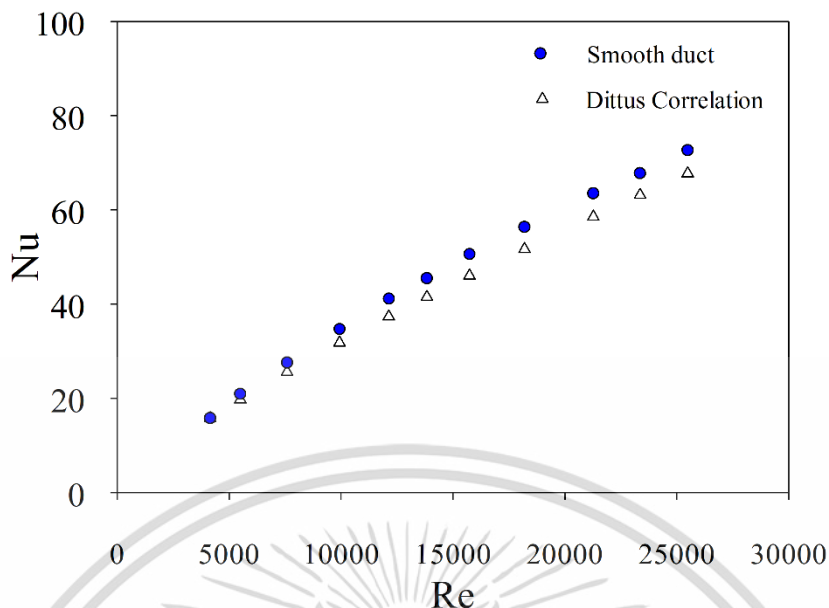
ภาพที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ส์ ในกรณีท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองและสมการสหสัมพันธ์ของ Blasius พบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 5.35% เมื่อเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Blasius โดยสมการสหสัมพันธ์ของ Blasius ใช้หาค่าตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อผิวเรียบ



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทาน และเลขเรย์โนลด์ส กรณีท่อผิวเรียบ

4.2.2 เลขนัสเซิลต์ (Nusselt number)

ในภาพที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์ และเลขเรย์โนลด์สในกรณีท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อเลขเรย์โนลด์ส มีค่าเพิ่มขึ้น เลขนัสเซิลต์จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบเลขนัสเซิลต์จากการทดลองกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ค่าของเลขนัสเซิลต์จากการทดลอง มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 7.11% เมื่อเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter โดยสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ใช้หาค่าเลขนัสเซิลต์ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่แล้วภายในท่อผิวเรียบ สำหรับเลขเรย์โนลด์ส $Re \geq 10,000$

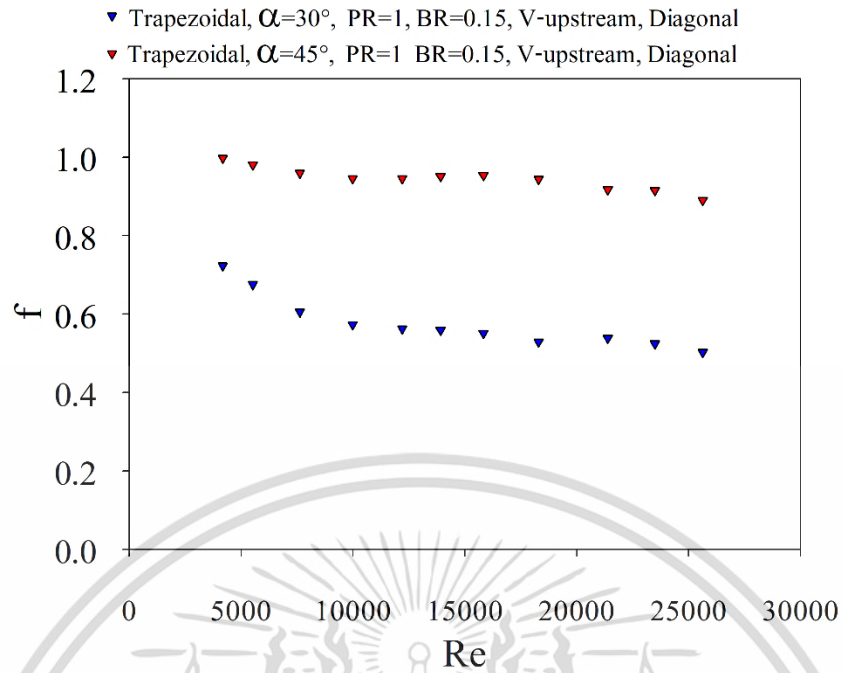


ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลต์ และเลขเรย์โนลด์ส กรณีท่อผิวเรียบ

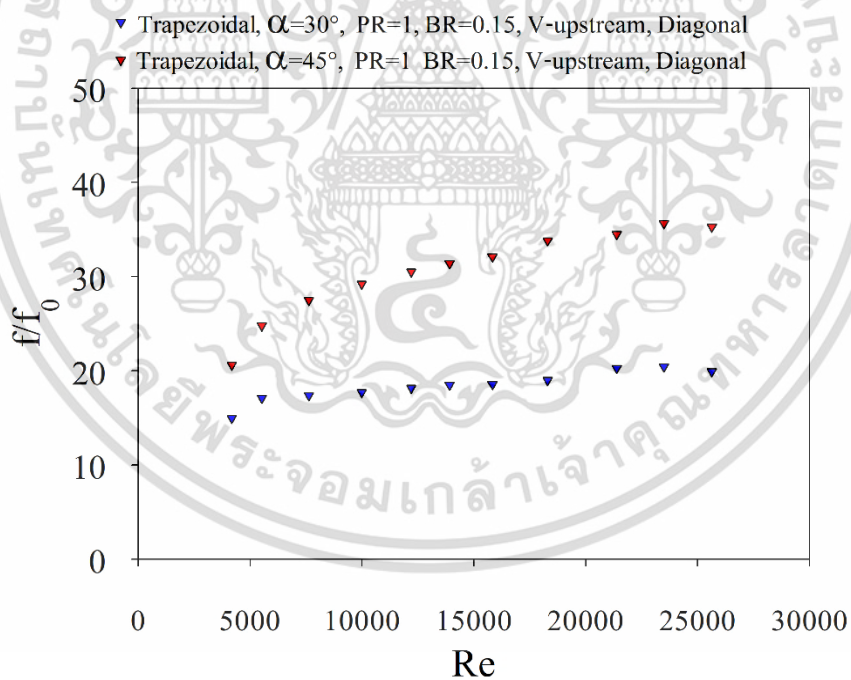
ผลการทดลองท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสผิวเรียบ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่น่าเชื่อถือและยอมรับได้ โดยตัวประกอบเสียดทาน เปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Blasius ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 5.35% และเลขนัสเซลต์เปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 7.11% ซึ่งนับว่าผลการทดลองมีความเชื่อถือได้ โดยทั่วไปผลการทดลองต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่ควรเกิน 10% นั่นคือว่าผลการทดสอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในครั้งนี้มีเชื่อถือ

4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะที่แตกต่างกันของแผ่นปีกรูปตัววี

พิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบในแนวเส้นทแยงมุมของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ด้วยแผ่นปีกรูปตัววีในรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 1.0 และอัตราส่วนบลิ๊อค เท่ากับ 0.15 กรณีที่มีมุมปะทะ เท่ากับ 30° และ 45° พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีที่มีมุมปะทะ เท่ากับ 45° มีค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่ามุมปะทะที่มีค่าเท่ากับ 30° เนื่องจากมุมปะทะส่งผลต่อการขัดขวางการไหลโดยตรงทำให้เกิดความดันตกคร่อมที่สูงขึ้นตามขนาดของมุมปะทะที่มีค่าสูงขึ้น ดังภาพที่ 4.3 และ 4.4



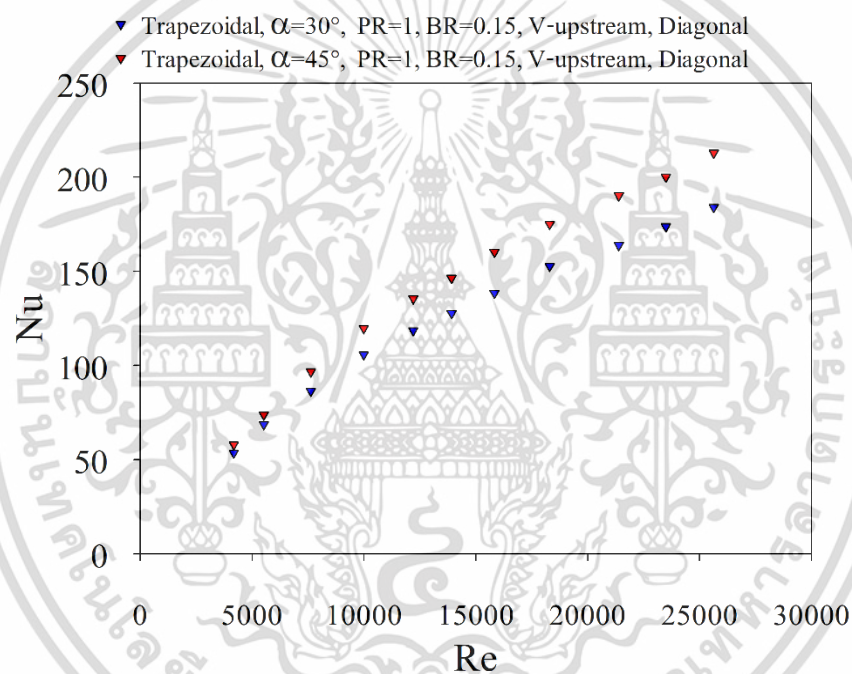
ภาพที่ 4.3 อิทธิพลของมุมปะทะต่อตัวประกอบเสียดทาน



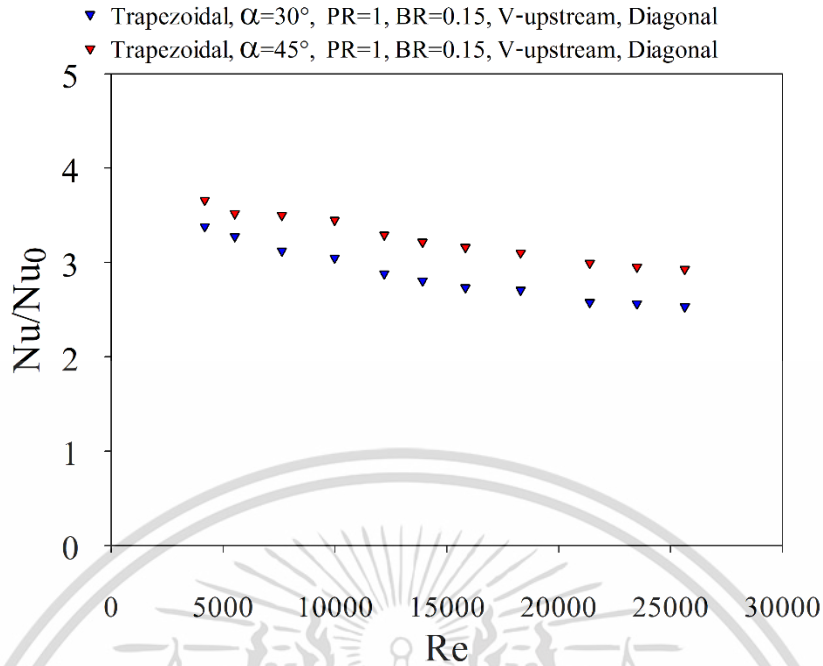
ภาพที่ 4.4 อิทธิพลของมุมปะทะต่ออัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบในแนวเส้นทแยงมุมของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ด้วยแผ่นปีกรูปตัววีในรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิทช์ เท่ากับ 1.0 และอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 กรณีที่มีมุมปะทะ เท่ากับ 30° และ 45° พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้เลขนัสเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีที่มีมุมปะทะ เท่ากับ 45° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่ามุมปะทะที่มีค่าเท่ากับ 30° เนื่องจากมุมปะทะ ส่งผลต่อรูปแบบพฤติกรรมของการไหลของของไหลให้เกิดการไหลความปั่นป่วนที่มากขึ้น โดยมุมปะทะที่มีค่ามากจะขวางการไหลได้มากกว่า ทำให้ส่งผลต่อการทำให้เกิดการไหลความปั่นป่วนมากกว่าเช่นกัน ดังภาพที่ 4.5 และ 4.6

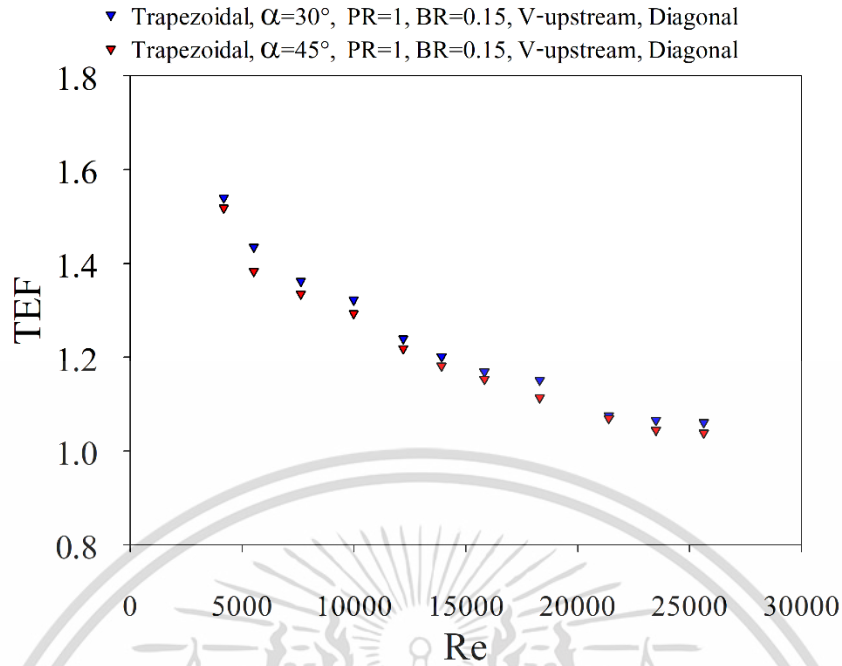


ภาพที่ 4.5 อิทธิพลของมุมปะทะต่อเลขนัสเซลล์



ภาพที่ 4.6 อิทธิพลของมุมปะทะต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลต์

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบในแนวเส้นทแยงมุมของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ด้วยแผ่นปีกรูปตัววีในรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิตช์เท่ากับ 1.0 และอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 กรณีที่มีมุมปะทะ เท่ากับ 30° และ 45° พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน แผ่นปีกรูปตัววีที่มีมุมปะทะ เท่ากับ 30° มีตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนเฉลี่ยมากกว่ากรณีที่มีมุมปะทะ เท่ากับ 45° ดังภาพที่ 4.7

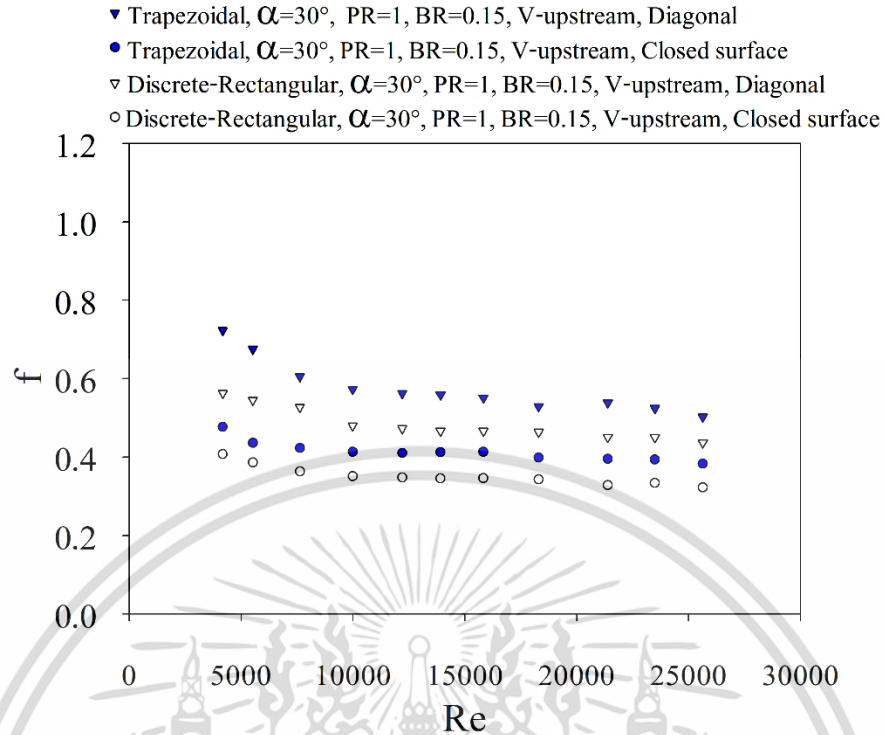


ภาพที่ 4.7 อิทธิพลของมุมปะทะต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

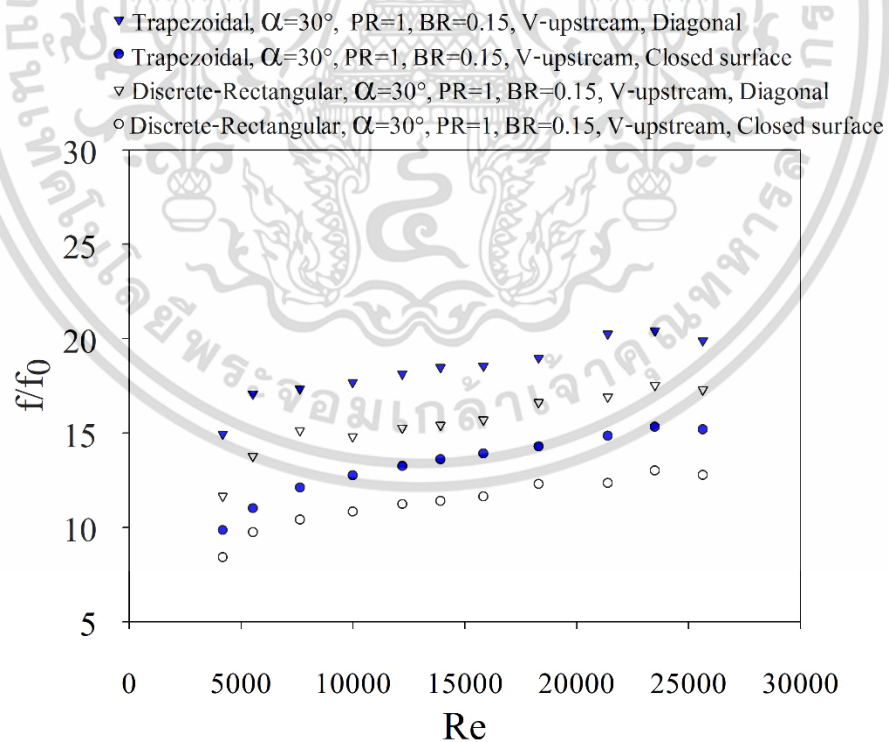
4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของวิธีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววี

จากหัวข้อ 4.3 ซึ่งแสดงผลการศึกษาตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซลล์ และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีศึกษาอิทธิพลของมุมปะทะของแผ่นปีกรูปตัววี พบว่าแผ่นปีกรูปตัววีที่มุมปะทะ เท่ากับ 30° ให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด ดังนั้นจึงนำแผ่นปีกรูปตัววีที่มุมปะทะ เท่ากับ 30° มาพิจารณาเพิ่มเติม

พิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีตามแนวเส้นทแยงมุม และกรณีติดตั้งแบบชิดผิวท่อทดสอบ มีการไหลแบบปลายวีชี้อนวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) แผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูและสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบตัดหัว มีอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีตามแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบให้ตัวประกอบเสียดทานที่มากกว่ากรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีแบบชิดพื้นผิวของท่อที่รูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีเดียวกัน เนื่องจากการติดตั้งตามแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบเป็นการขวางทิศทางการไหลของของไหลโดยตรง ดังนั้นเมื่อแผ่นปีกรูปตัววีมาติดตั้งให้ชิดพื้นผิวท่อทดสอบ ส่งผลให้ความดันตกคร่อมมีค่าน้อยลง อันเนื่องมาจากการลดการปะทะกับของไหลโดยตรง ดังภาพที่ 4.8 และ 4.9



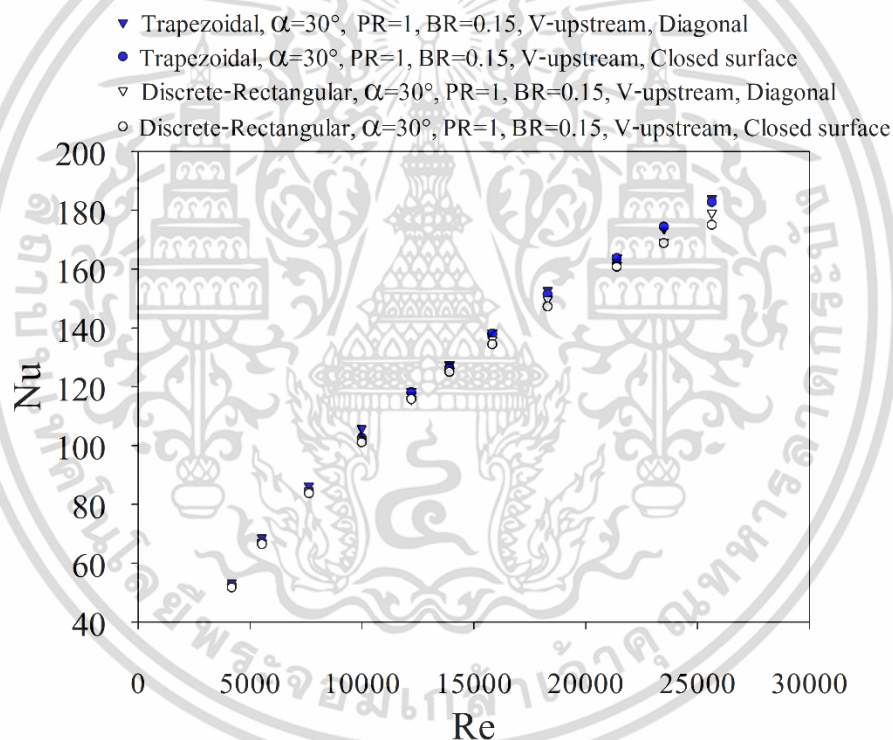
ภาพที่ 4.8 อิทธิพลของวิธีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบเสียดทาน



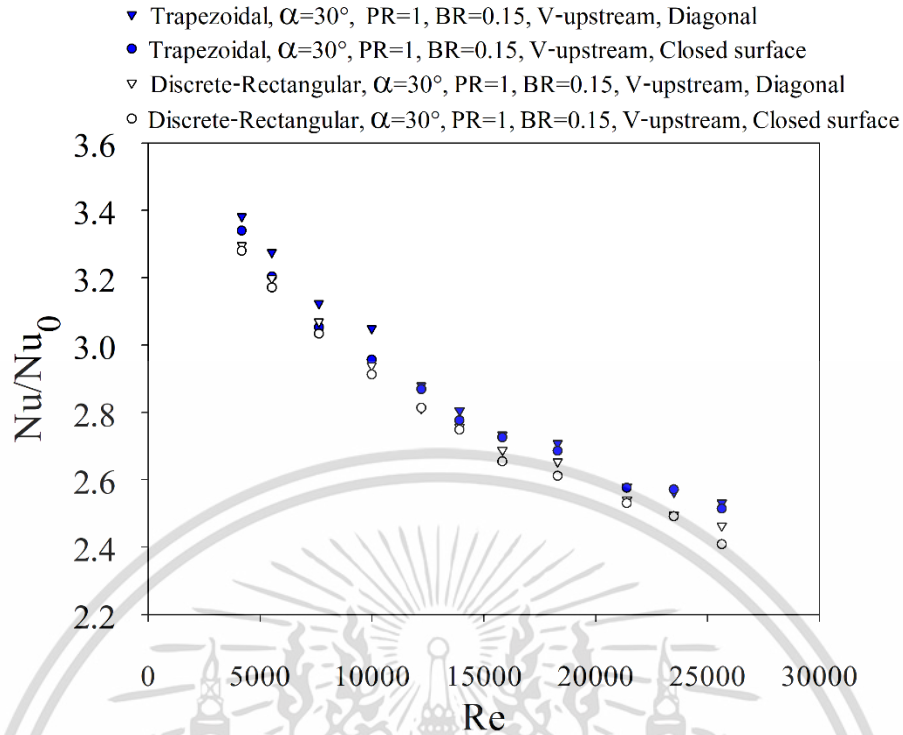
ภาพที่ 4.9 อิทธิพลของวิธีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนตัวของประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีตามแนวเส้นทแยงมุม และกรณีติดตั้งแบบชิดผิวท่อทดสอบ มีการไหลแบบปลายวีชี้ส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) แผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูและสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบตัดหัว มีอัตราส่วนพิชต์เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้เลขนัสเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีตามแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบให้เลขนัสเซลล์ที่มากกว่ากรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีแบบชิดพื้นผิวของท่อที่รูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีเดียวกัน เนื่องจากการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีตามแนวเส้นทแยงมุมเป็นการขวางทิศทางการไหลของของไหลโดยตรง ส่งผลให้พฤติกรรมของกระแสการไหลที่ไหลมาชนแผ่นปีกรูปตัววี เกิดการปั่นป่วนมากกว่าการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีบริเวณชิดพื้นผิวท่อทดสอบ ดังภาพที่ 4.10 และ 4.11

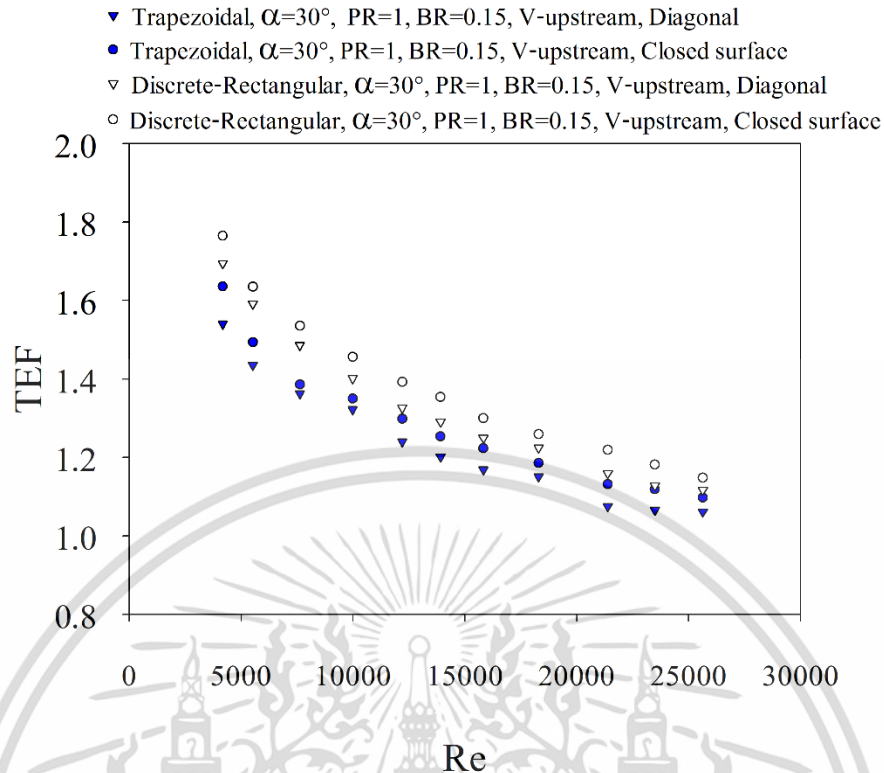


ภาพที่ 4.10 อิทธิพลของวิธีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีต่อเลขนัสเซลล์



ภาพที่ 4.11 อิทธิพลของวิธีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลต์

และพิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีตามแนวเส้นทแยงมุม และกรณีติดตั้งแบบชิดผิวท่อทดสอบ มีการไหลแบบปลายวีซึ่งสวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) แผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูและสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบตัดหัว มีอัตราส่วนพิทช์ เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีแบบชิดพื้นผิวของท่อทดสอบให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนที่มากกว่ากรณีติดตั้งในแนวเส้นทแยงมุมที่รูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีเดียวกัน ดังภาพที่ 4.12

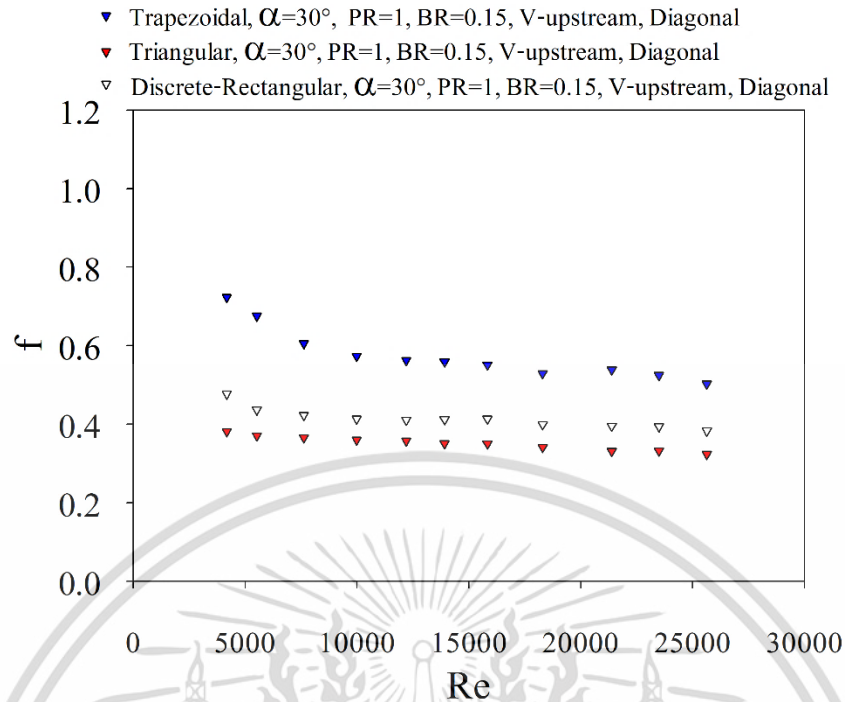


ภาพที่ 4.12 อิทธิพลของวิธีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

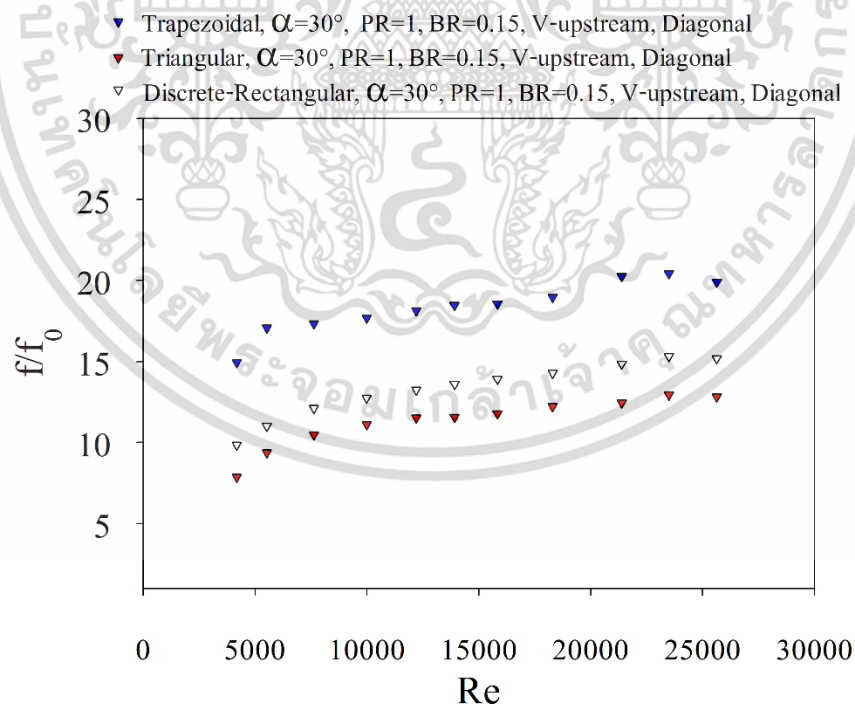
4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี

4.5.1 กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีตามแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบ

พิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีตามแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิทช์ เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีรูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบตัดหัว และสามเหลี่ยม พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูมีค่าตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุด รองลงมา คือ รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบตัดหัว และรูปทรงสามเหลี่ยม ตามลำดับ เนื่องจากพื้นที่ผิวรูปทรงของแผ่นปีกรูปตัววี มีผลต่อการขัดขวางการไหลของของไหล ดังนั้นเมื่อรูปทรงของแผ่นปีกรูปตัววีมีพื้นที่ผิวน้อย ส่งผลให้ความดันตกคร่อมมีค่าลดลง ดังภาพที่ 4.13 และ 4.14



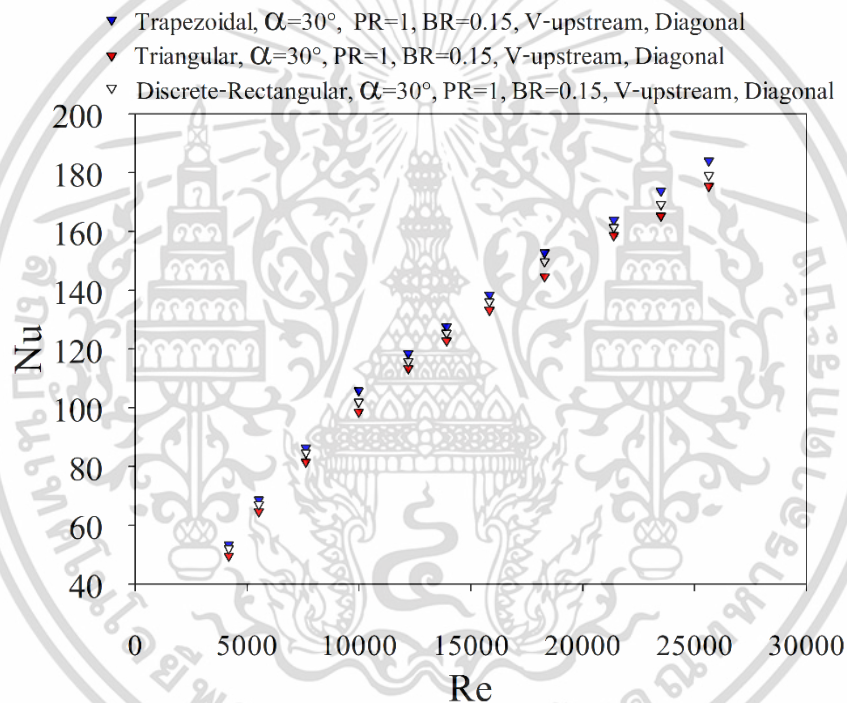
ภาพที่ 4.13 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งในแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบ ต่อตัวประกอบเสียดทาน



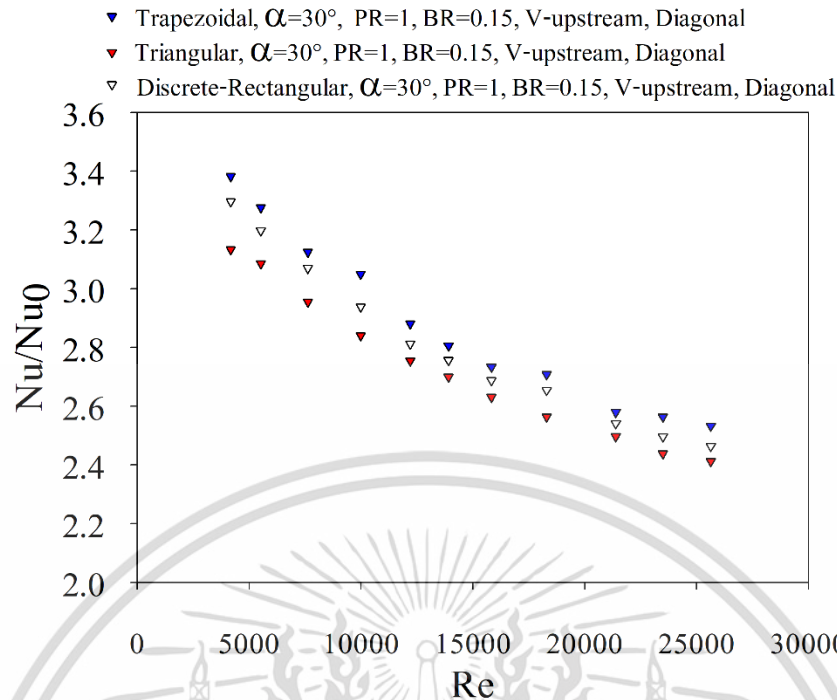
ภาพที่ 4.14 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งในแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบ ต่ออัตราส่วนตัวของประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีตามแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิทช์ เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีรูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบตัดหัว และสามเหลี่ยม พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้เลขนัสเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูมีเลขนัสเซลล์สูงที่สุด รองลงมา คือ รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบตัดหัว และรูปทรงสามเหลี่ยม ตามลำดับ เนื่องจากพื้นที่ผิวรูปทรงของแผ่นปีกรูปตัววี มีผลต่อการขัดขวางการไหลของของไหล ส่งผลให้พฤติกรรมของกระแสการไหลที่ไหลมาชนแผ่นปีกรูปตัววี เกิดการปั่นป่วนมากกว่าแผ่นปีกรูปตัววีที่มีพื้นที่ผิวน้อย ดังภาพที่ 4.15 และ 4.16

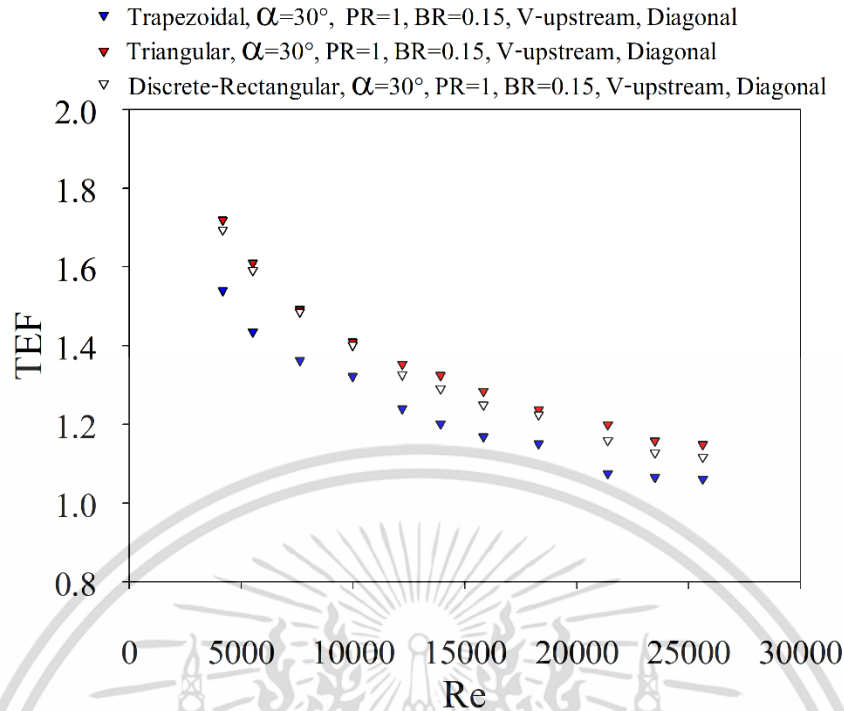


ภาพที่ 4.15 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งในแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบต่อเลขนัสเซลล์



ภาพที่ 4.16 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งในแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบ ต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลล์ต์

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีตามแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิทช์ เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีรูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบตัดหัว และสามเหลี่ยม พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสามเหลี่ยมให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนเฉลี่ยมากกว่า รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบตัดหัว และสี่เหลี่ยมคางหมู ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.17



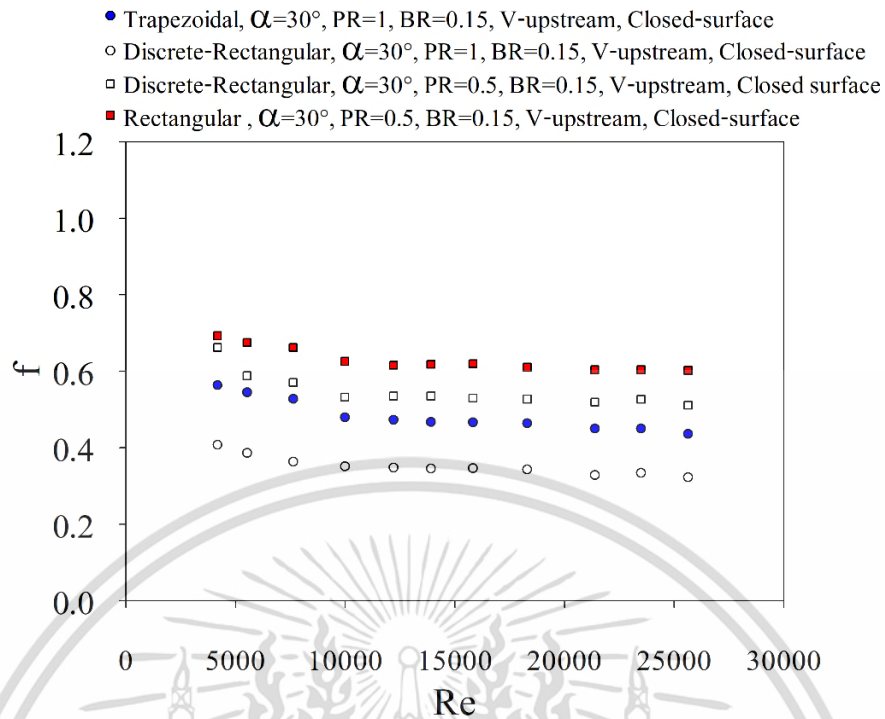
ภาพที่ 4.17 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งในแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบ ต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

4.5.2 กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีชนิดพื้นผิวท่อทดสอบ

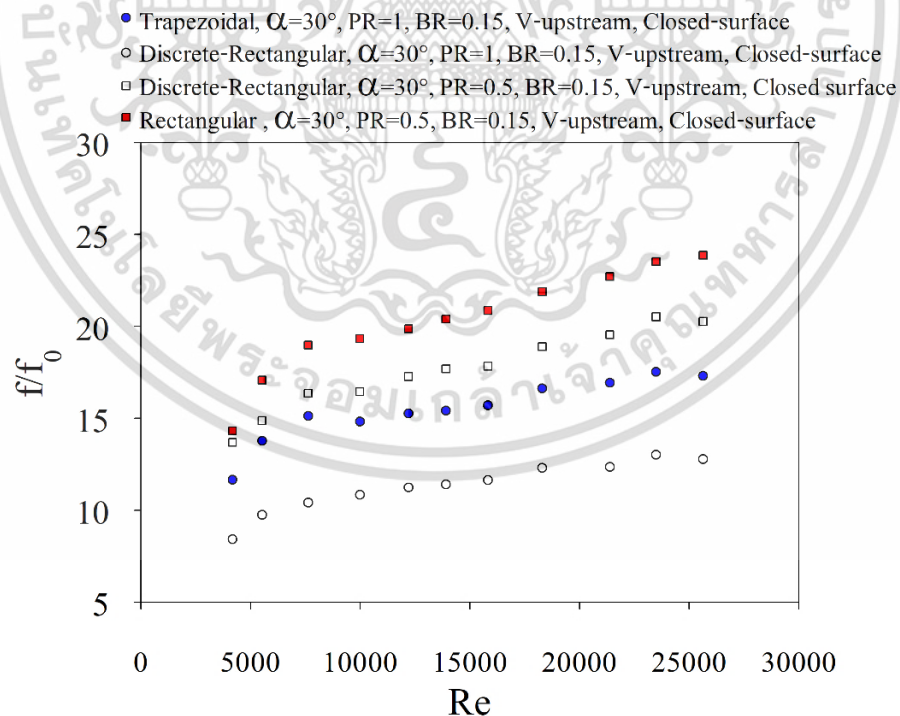
จากหัวข้อ 4.5.1 ซึ่งแสดงผลการศึกษาตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซลต์ และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีในแนวเส้นทแยงมุมของท่อทดสอบ พบว่าแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสามเหลี่ยมให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด แต่เนื่องจากรูปทรงสามเหลี่ยม เมื่อนำมาทำการทดลองติดตั้งแบบชนิดพื้นผิวท่อทดสอบ เกิดปัญหาเรื่องวิธีการติดตั้ง ดังนั้นจึงนำรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว ที่ซึ่งมีตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนรองลงมาจากรูปทรงสามเหลี่ยมมาพิจารณาเพิ่มเติม

พิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทาน เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีแบบชนิดพื้นผิวท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิตช์เท่ากับ 0.5 และ 1.0 อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีรูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู สี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็ม และสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลง โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูและสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมตัดหัว เมื่อพิจารณาที่รูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีเดียวกัน เนื่องจากพื้นที่ผิวรูปทรงของแผ่นปีกรูปตัววี มีผลต่อการขัดขวางการไหล ดังนั้นเมื่อรูปทรงของแผ่นปีกรูปตัววีมีพื้นที่ผิวน้อย ส่งผลให้ความดันตกคร่อมมีค่าลดลง ดังภาพที่ 4.18 และ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเผยแพร่เท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



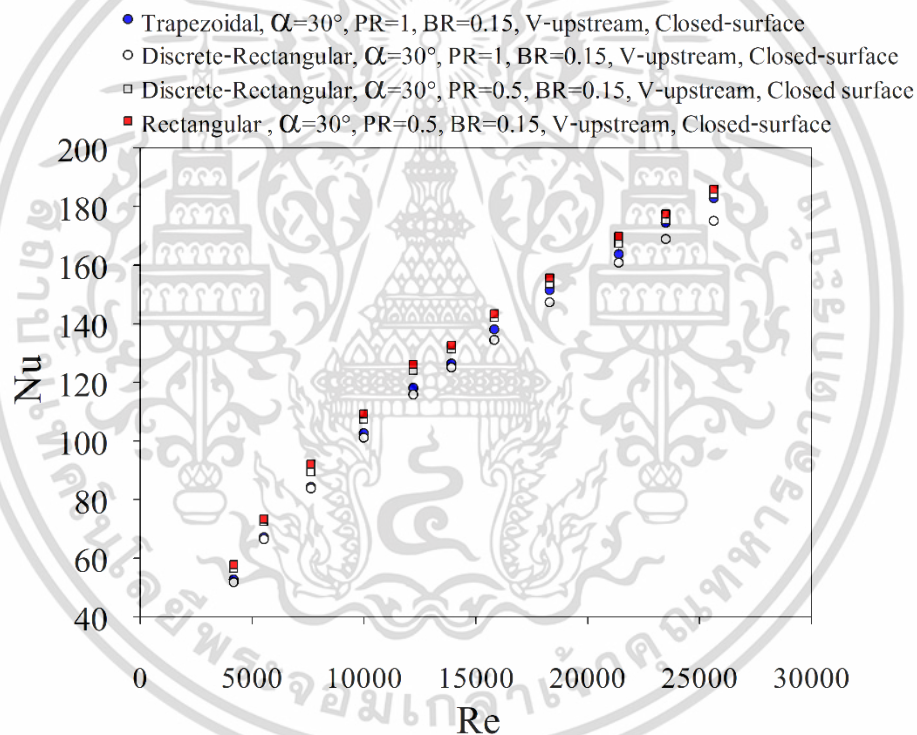
ภาพที่ 4.18 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบต่อตัวประกอบเสียดทาน



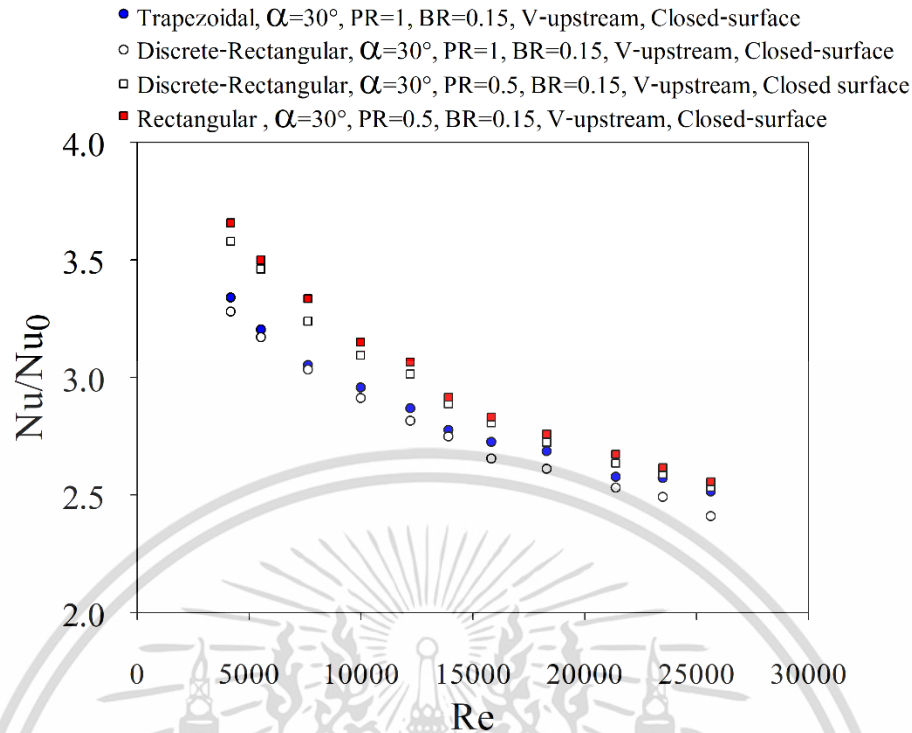
ภาพที่ 4.19 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบต่ออัตราส่วนตัวของประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิทช์ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีรูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู สี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็ม และสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้เลขนัสเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูและสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มให้เลขนัสเซลล์สูงกว่าแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมตัดหัว เมื่อพิจารณาที่รูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีเดียวกัน เนื่องจากพื้นที่ผิวรูปทรงของแผ่นปีกรูปตัววี มีผลต่อการขัดขวางการไหลของของไหล ส่งผลให้พฤติกรรมของกระแสการไหลที่ไหลมาชนแผ่นปีกรูปตัววี เกิดการปั่นป่วนมากกว่าแผ่นปีกรูปตัววีที่มีพื้นที่ผิวน้อย ดังภาพที่ 4.20 และ 4.21

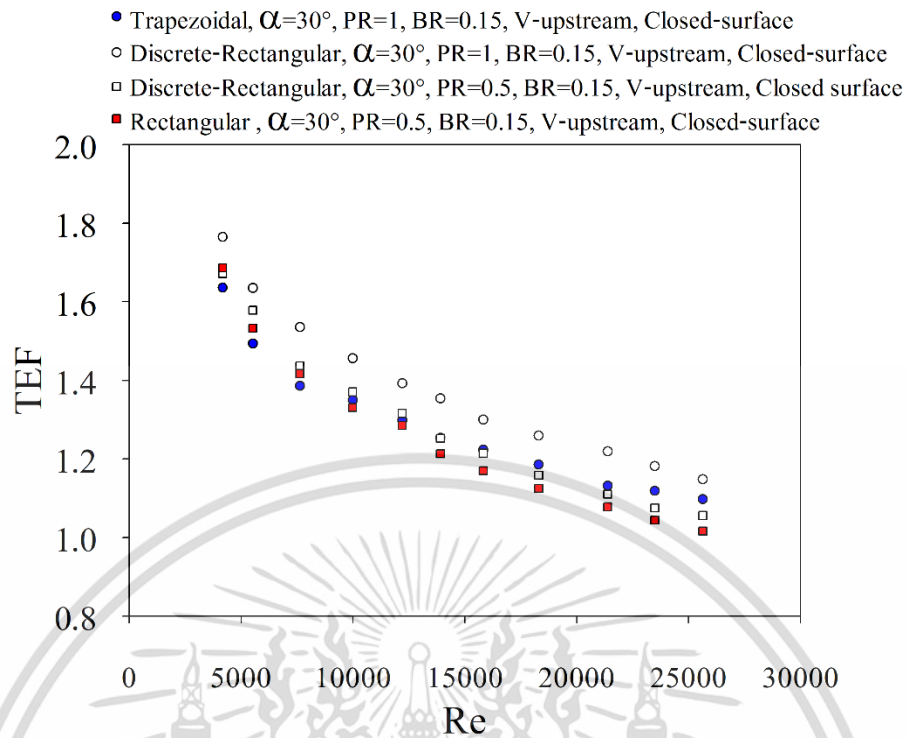


ภาพที่ 4.20 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบต่อเลขนัสเซลล์



ภาพที่ 4.21 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลต์

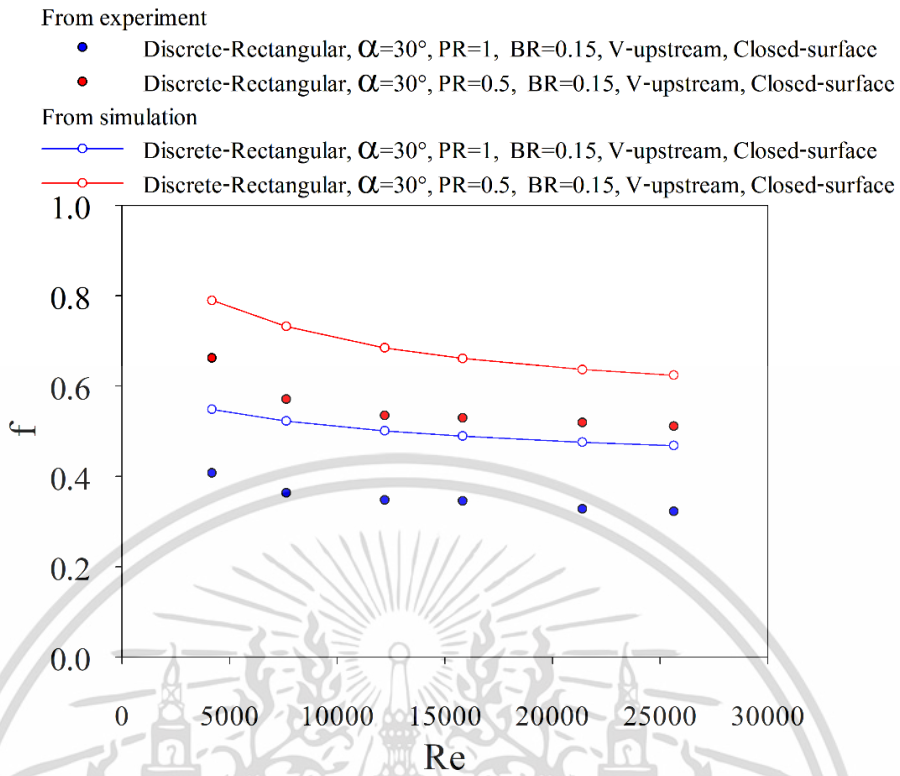
และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิทช์ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีรูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู สี่เหลี่ยมผืนผ้า หัวเต็ม และสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบตัดหัวให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนเฉลี่ยมากกว่า รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู และสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็ม เมื่อพิจารณาที่รูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีเดียวกัน ดังภาพที่ 4.22



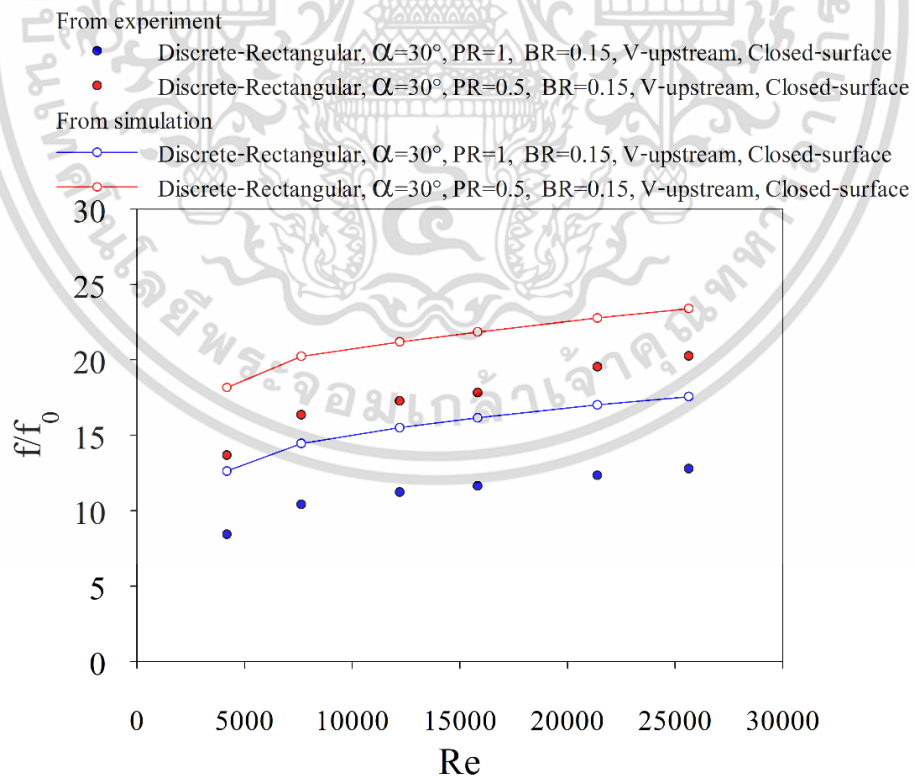
ภาพที่ 4.22 อิทธิพลของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี เมื่อติดตั้งแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

4.6 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี

พิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววี รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว แบบชิดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้อนวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีแผ่นปีกรูปตัววีมีอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีที่มีอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่าอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 1.0 ดังภาพที่ 4.23 และ 4.24



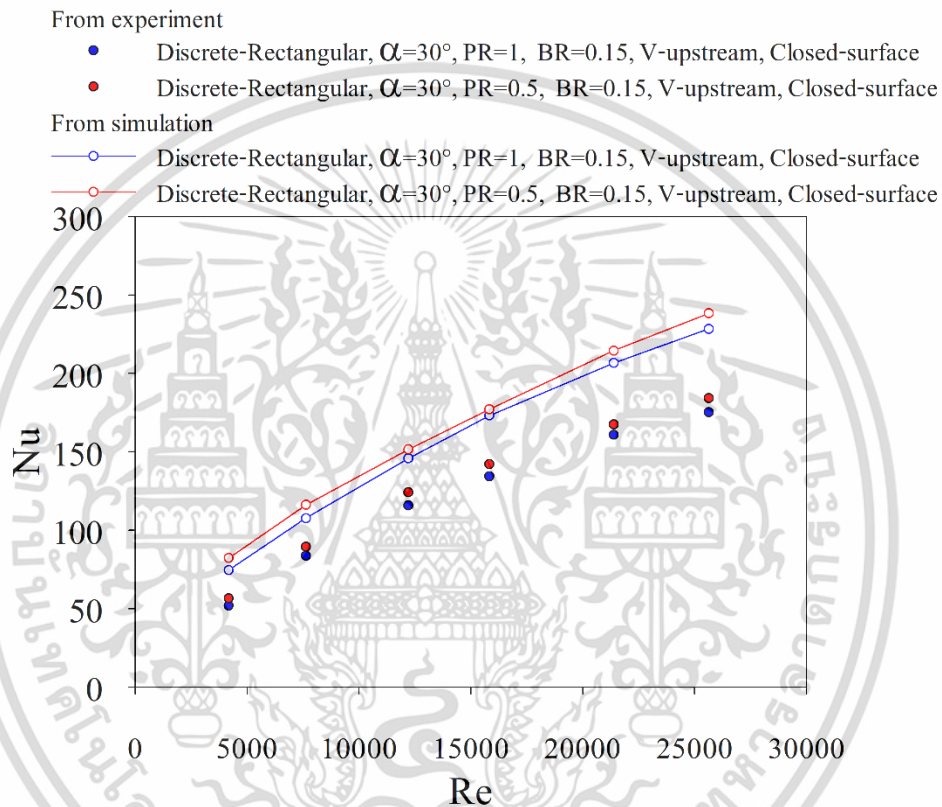
ภาพที่ 4.23 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ของแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบเสียดทาน



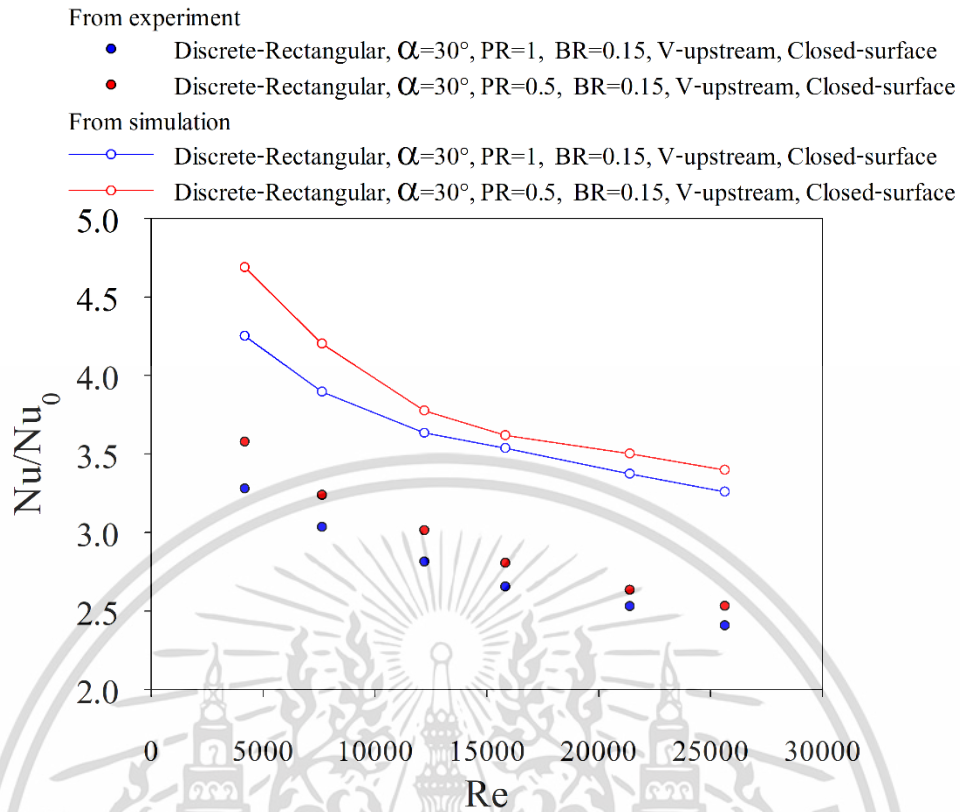
ภาพที่ 4.24 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ของแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนตัวของประกอบเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว แบบขีดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีแผ่นปีกรูปตัววีมีอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้เลขนัสเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีที่มีอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 ให้เลขนัสเซลล์มากกว่าอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 1.0 ดังภาพที่ 4.25 และ 4.26

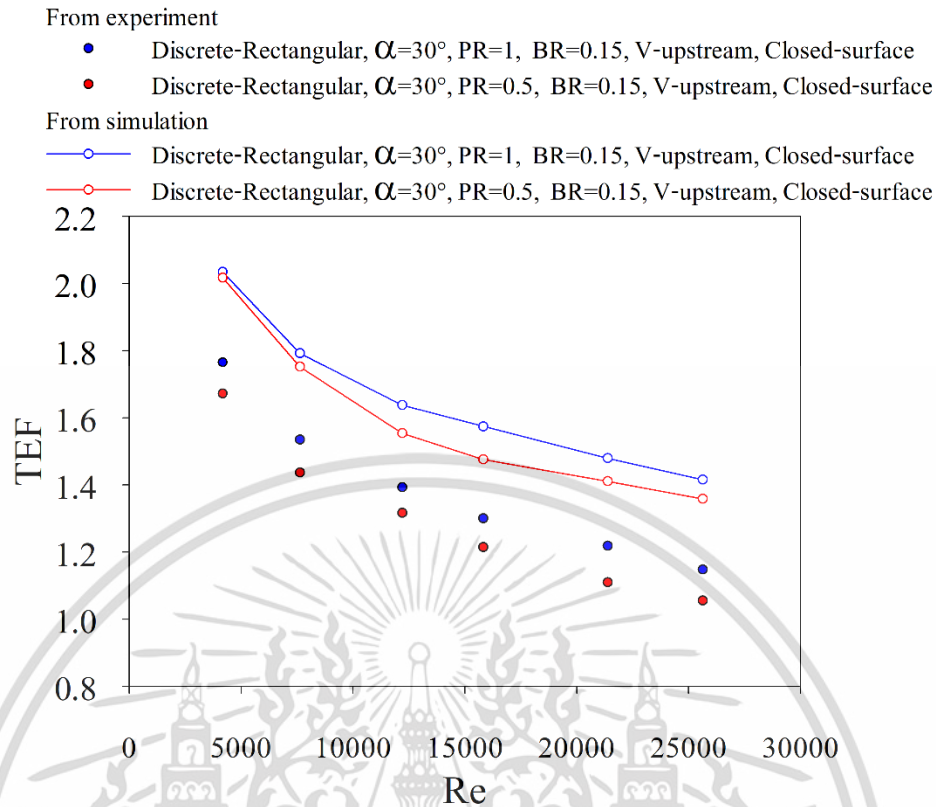


ภาพที่ 4.25 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ของแผ่นปีกรูปตัววีต่อเลขนัสเซลล์



ภาพที่ 4.26 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ของแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลล์

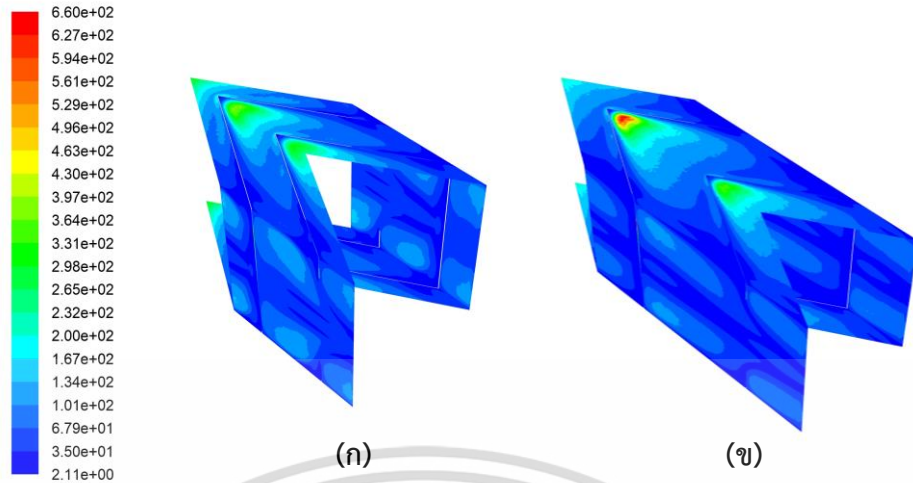
และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว แบบชิดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีแผ่นปีกรูปตัววีมีอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีที่มีอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 1.0 ให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่าอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 ดังภาพที่ 4.27



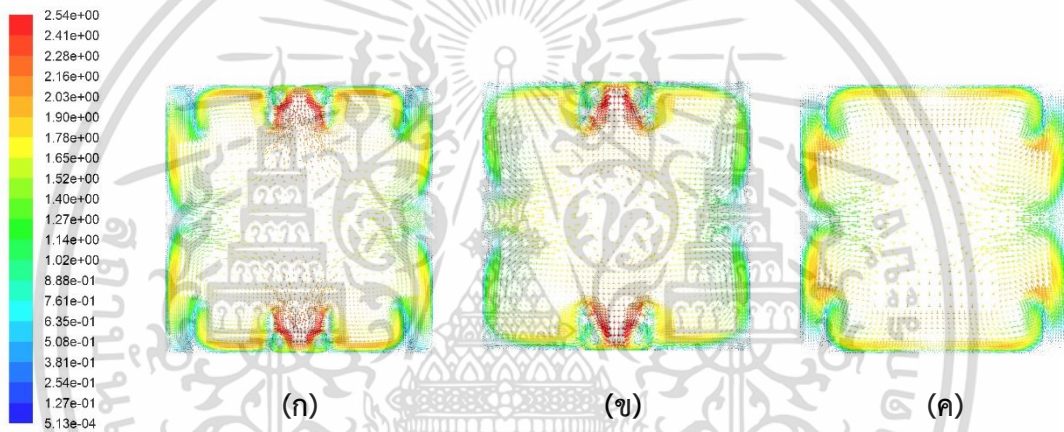
ภาพที่ 4.27 อิทธิพลของอัตราส่วนพิตช์ของแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยเวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล ดังภาพที่ 4.29 พบว่าทุกกรณีของอัตราส่วนพิตช์ ก่อให้เกิดการหมุนวนหลักบริเวณด้านหลังของแผ่นปีกรูปตัววี โดยการหมุนวนนั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกัน และมีความรุนแรงของการหมุนวนลดลงตามค่าของอัตราส่วนพิตช์ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบของทิศทางการไหล ดังภาพที่ 4.30 จะเห็นได้ว่าการหมุนวนนั้นจะมีความถี่ตามแนวการไหลที่ลดลงหรือมีระยะของเกลียวที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าของอัตราส่วนพิตช์เพิ่มขึ้น

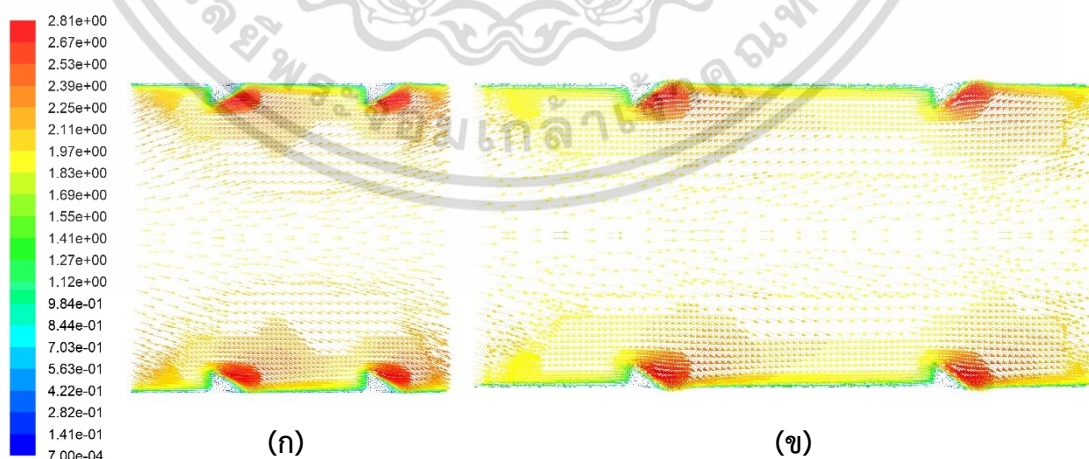
และเมื่อพิจารณาได้ด้วยคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ เมื่อการหมุนวนมีความรุนแรงที่ลดลงและมีระยะเกลียวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณผนังท่อด้านข้าง และผนังท่อด้านบน-ล่างที่ห่างออกจากแผ่นปีกมีค่าลดลงเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.28



ภาพที่ 4.28 คอนทัวร์ของเลขน้สเซลต์ (ก) PR = 0.5 และ (ข) PR = 1.0



ภาพที่ 4.29 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล (ก) PR = 0.5, (ข) บริเวณหัวของปีกรูปตัววี PR = 1.0 และ (ค) บริเวณปลายของปีกรูปตัววี PR = 1.0



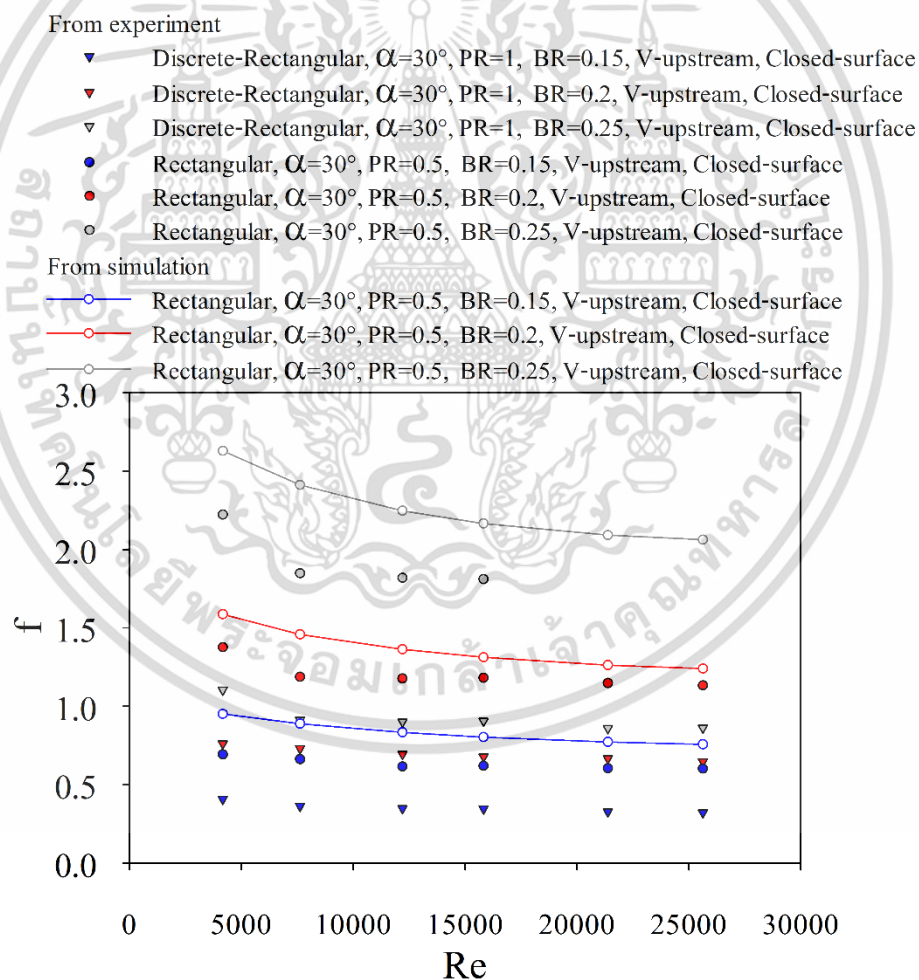
ภาพที่ 4.30 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบทิศทางการไหล (ก) PR = 0.5 และ (ข) PR = 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของรูปทรงแผ่นปีกรูปตัววี

4.7.1 กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)

พิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววี รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มและสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว แบบขีดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้ส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีแผ่นปีกรูปตัววีมีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2, 0.25 จากการทดลอง พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีที่มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.25 ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานสูงสุด รองลงมา คือ 0.2 และ 0.15 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่รูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววี เดียวกัน ดังภาพที่ 4.31 และ 4.32



ภาพที่ 4.31 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบเสียดทาน กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)

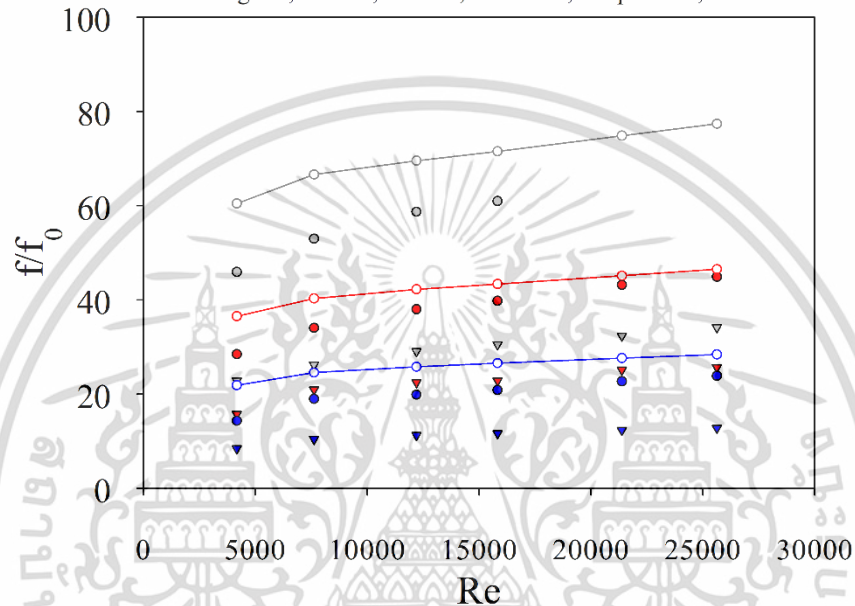
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From experiment

- ▼ Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface

From simulation

- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface



ภาพที่ 4.32 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนตัวของประกอบเสียดทานกรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)

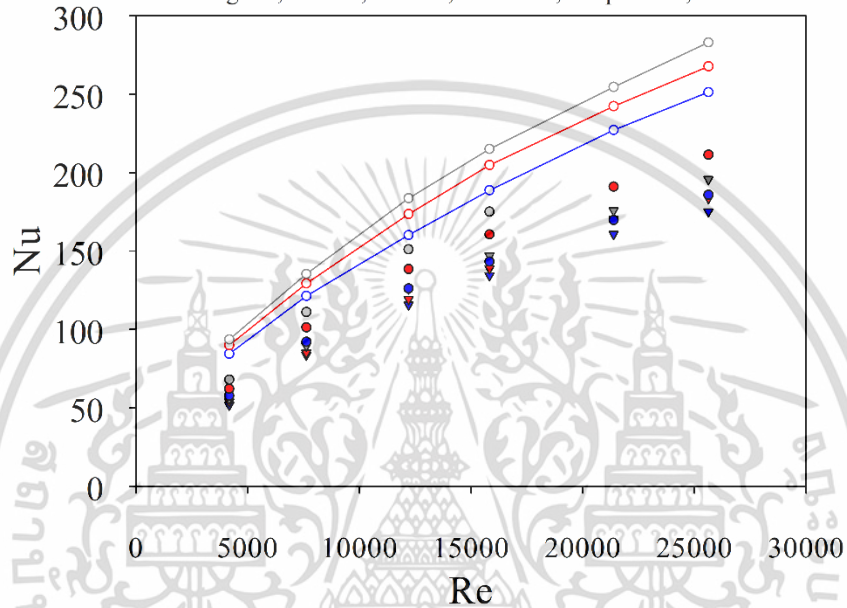
พิจารณาเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มและสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว แบบขีดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิทช์ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีแผ่นปีกรูปตัววีมีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2, 0.25 จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้เลขนัสเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีที่มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.25 ให้เลขนัสเซลล์สูงสุด รองลงมา คือ 0.2 และ 0.15 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่รูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีเดียวกัน ดังภาพที่ 4.33 และ 4.34

From experiment

- ▼ Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface

From simulation

- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface



ภาพที่ 4.33 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่อเลขนีสเซลล์ กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)

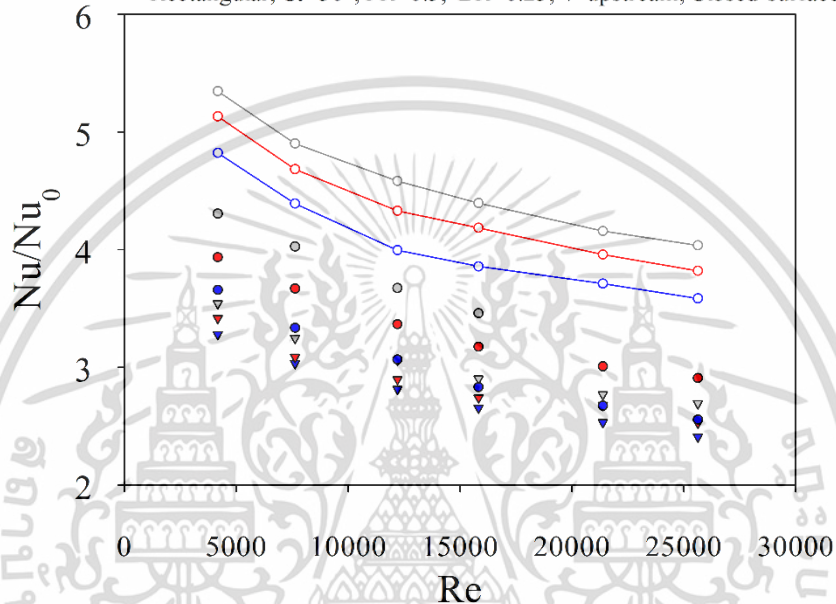
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From experiment

- ▼ Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface

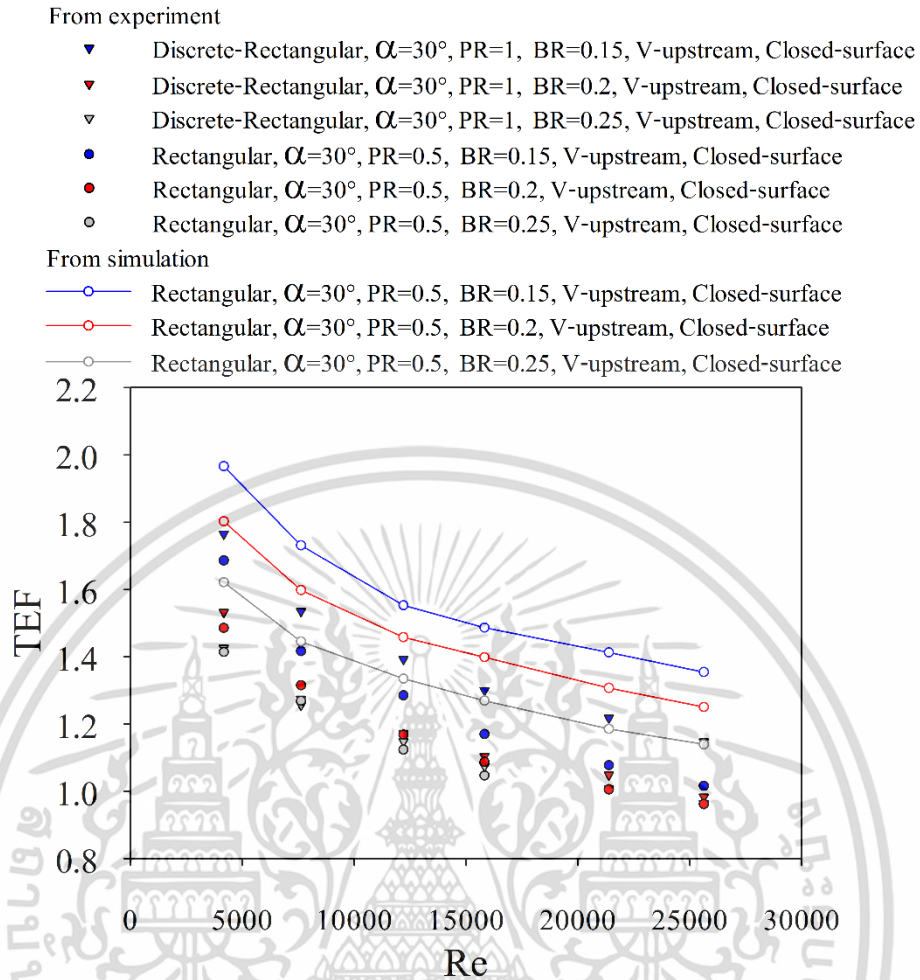
From simulation

- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface



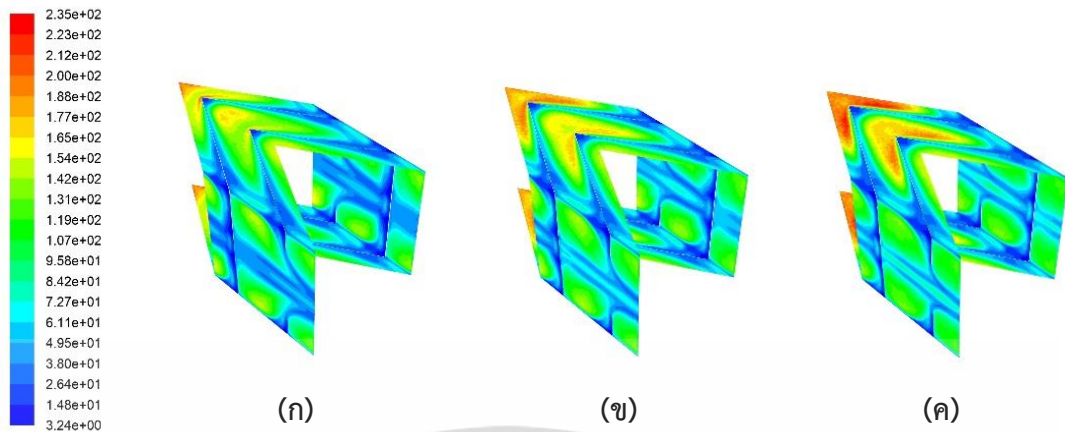
ภาพที่ 4.34 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลล์ กรณีการไหลแบบปลายวีชี้นำทางกับกระแสการไหล (V-upstream)

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มและสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว แบบชนิดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้นำทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิทช์ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีแผ่นปีกรูปตัววีมีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2, 0.25 จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีที่มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 ให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงที่สุด รองลงมา คือ 0.2 และ 0.25 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่รูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีเดียวกัน ดังภาพที่ 4.35



ภาพที่ 4.35 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีการไหลแบบปลายวีชี้นทางกับกระแสการไหล (V-upstream)

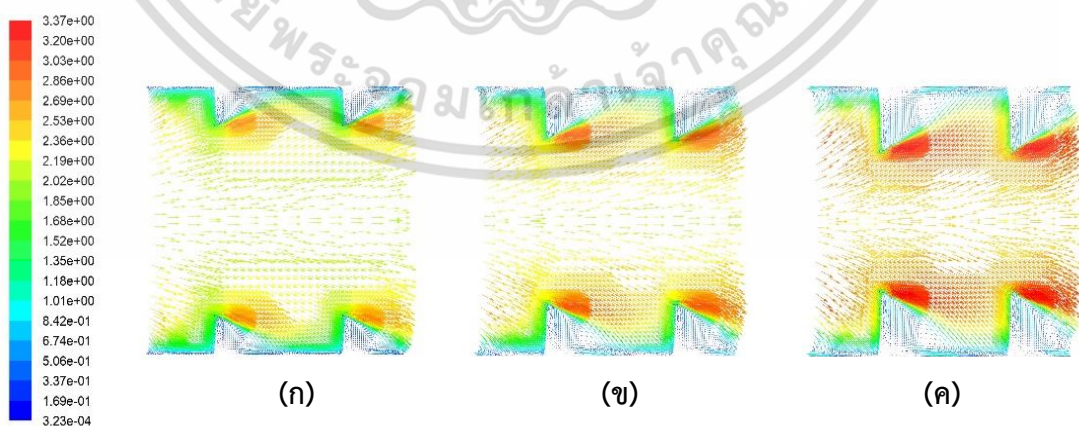
จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยเวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล ดังภาพที่ 4.37 พบว่าทุกกรณีของอัตราส่วนบล็อก ก่อให้เกิดการหมุนวนหลักบริเวณด้านหลังของแผ่นปีกรูปตัววี โดยการหมุนวนนั้นจะมีความรุนแรงสูงขึ้นตามค่าของอัตราส่วนบล็อกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในระบบมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบของทิศทางการไหล ดังภาพที่ 4.38 จะเห็นได้ว่าที่ด้านหลังของแผ่นปีกรูปตัววี บริเวณหัวของปีกจะมีการหมุนวนขนาดเล็กด้วยความเร็วต่ำเกิดขึ้น และจะขยายบริเวณกว้างขึ้นเมื่ออัตราส่วนบล็อกมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้กระแสของการไหลที่มีความเร็วสูงบริเวณกลางท่อตกลงสู่ผิวท่อได้ยาก และการถ่ายเทความร้อนบริเวณนี้จึงเกิดขึ้นได้น้อยลง



ภาพที่ 4.36 คอนทัวร์ของเลขนีสเซนต์ กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) (ก) BR = 0.15 , (ข) BR = 0.2 และ (ค) BR = 0.25



ภาพที่ 4.37 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) (ก) BR = 0.15 , (ข) BR = 0.2 และ (ค) BR = 0.25

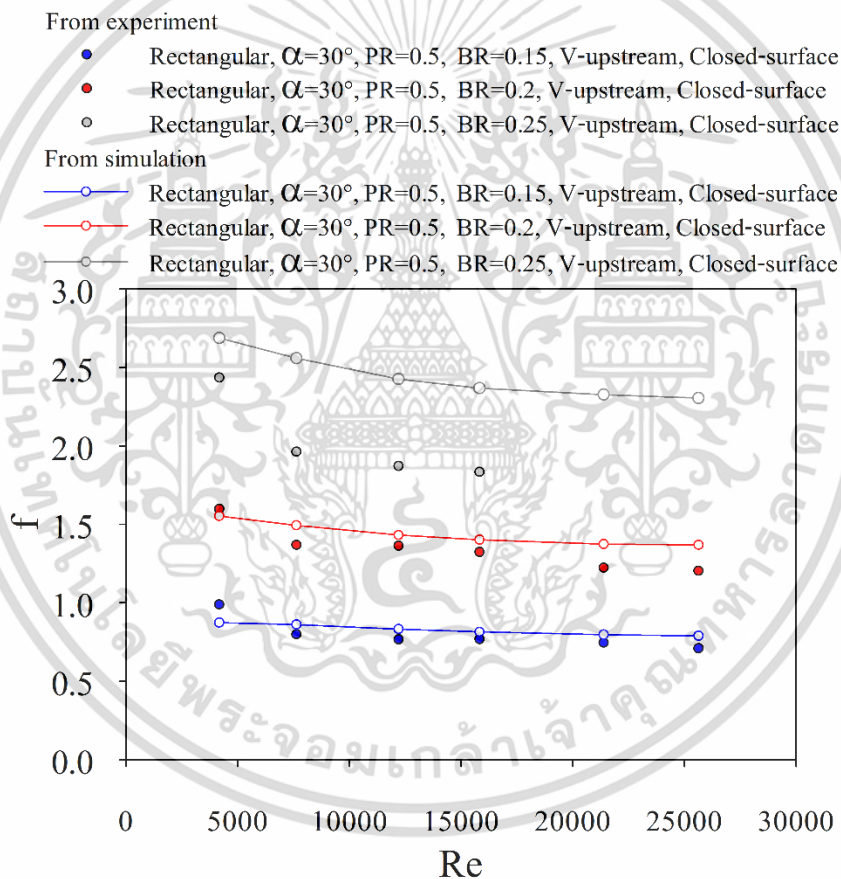


ภาพที่ 4.38 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) (ก) BR = 0.15 , (ข) BR = 0.2 และ (ค) BR = 0.25

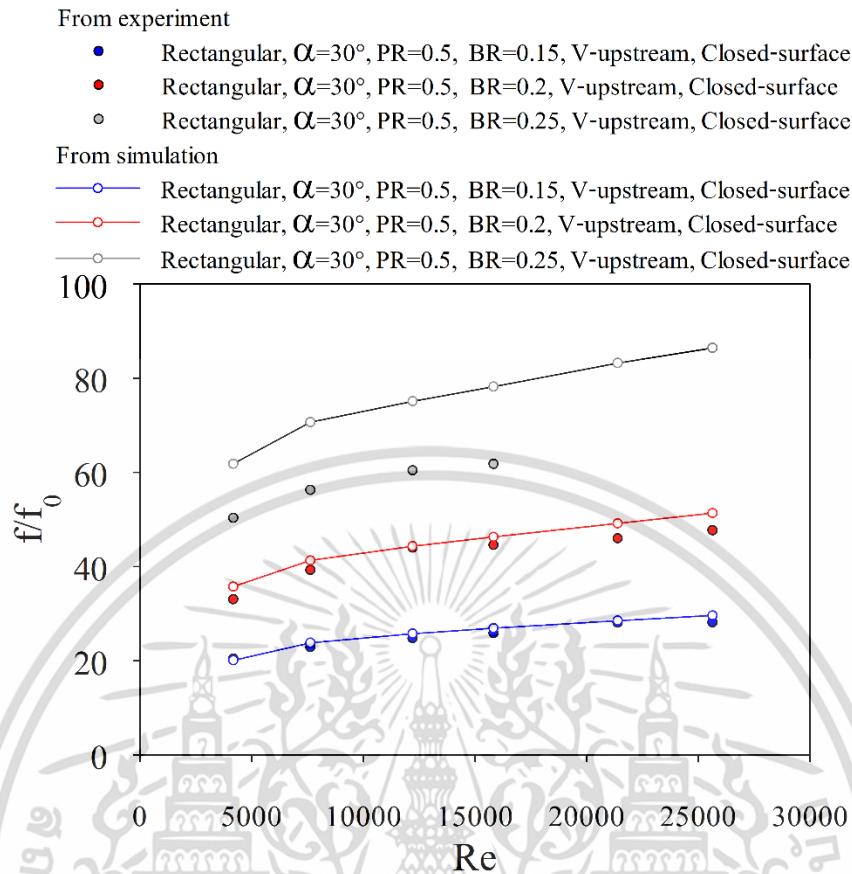
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 กรณีการไหลแบบปลายวีซีตามกับกระแสการไหล (V-downstream)

พิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววี รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มและสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว แบบชนิดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีซีตามกับกระแสการไหล (V-downstream) ที่มีอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีแผ่นปีกรูปตัววีมีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2, 0.25 จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลง เล็กน้อย โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีที่มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.25 ให้ค่าตัวประกอบเสียดทาน สูงที่สุด รองลงมา คือ 0.2 และ 0.15 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่รูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีเดียวกัน ดังภาพที่ 4.39 และ 4.40

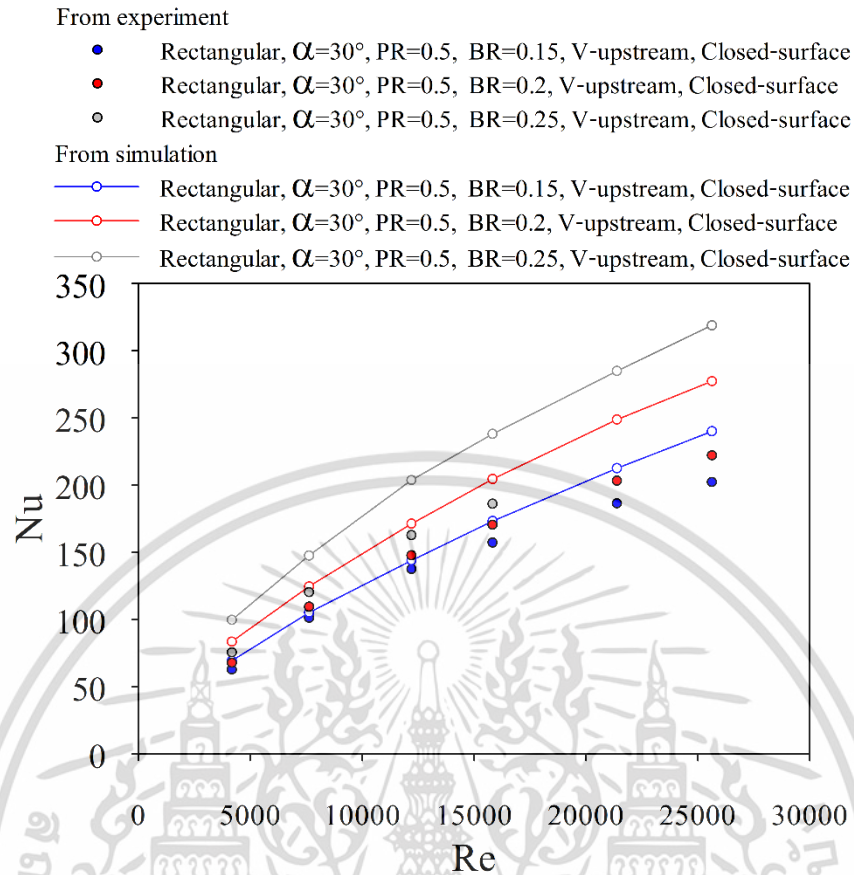


ภาพที่ 4.39 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบเสียดทาน กรณีการไหลแบบปลายวีซีตามกับกระแสการไหล (V-downstream)

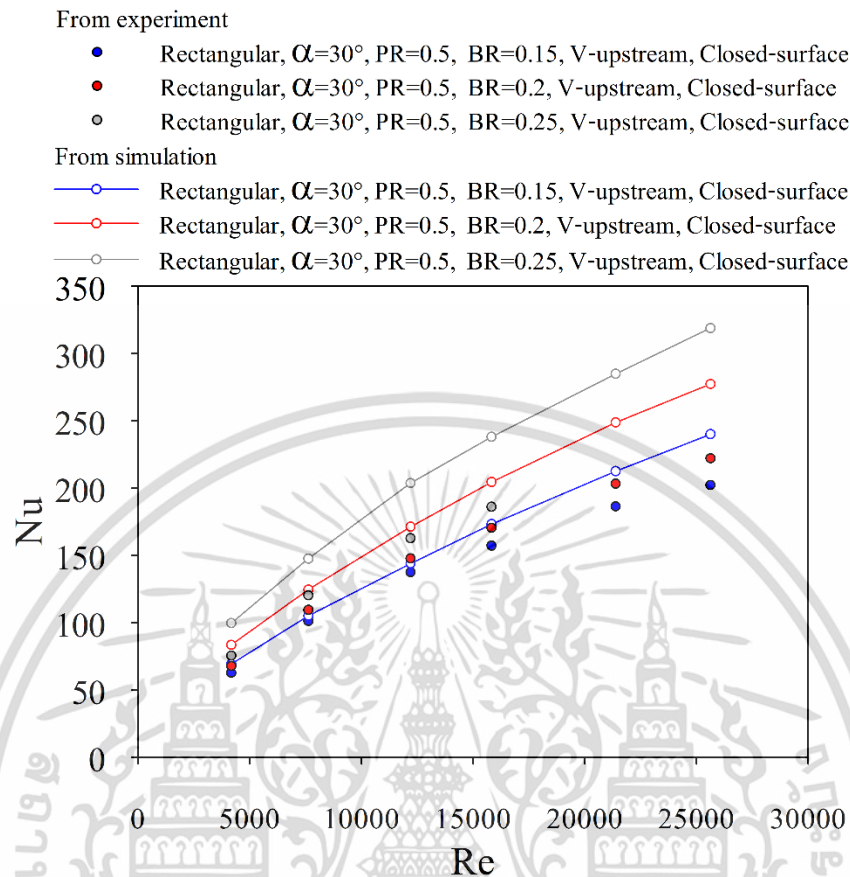


ภาพที่ 4.40 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนตัวของประกอบเสียดทานกรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream)

พิจารณาเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มและสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว แบบขีดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream) ที่มีอัตราส่วนพิทช์ เท่ากับ 0.5 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีแผ่นปีกรูปตัววีมีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2, 0.25 จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้เลขนัสเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีที่มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.25 ให้เลขนัสเซลล์สูงที่สุด รองลงมา คือ 0.2 และ 0.15 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่รูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีเดียวกัน ดังภาพที่ 4.41 และ 4.42

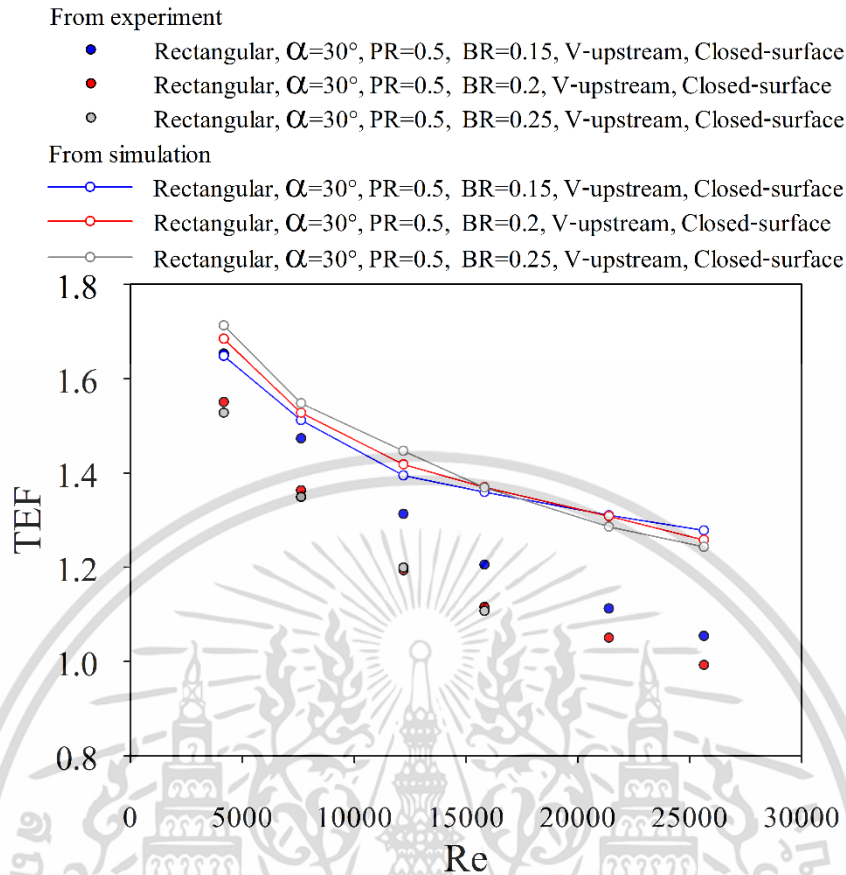


ภาพที่ 4.41 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่อเลขนัสเซลล์ กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream)



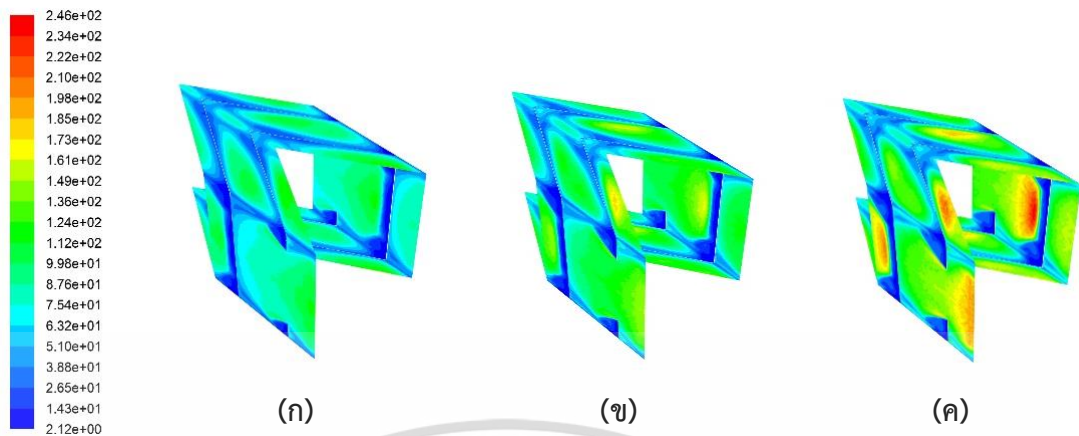
ภาพที่ 4.42 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลต์ กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream)

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มและสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว แบบขีดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream) ที่มีอัตราส่วนพิทช์ เท่ากับ 0.5 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีแผ่นปีกรูปตัววีมีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2, 0.25 จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน กรณีติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีที่มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15 ให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด รองลงมา คือ 0.2 และ 0.25 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่รูปแบบของแผ่นปีกรูปตัววีเดียวกัน ดังภาพที่ 4.43

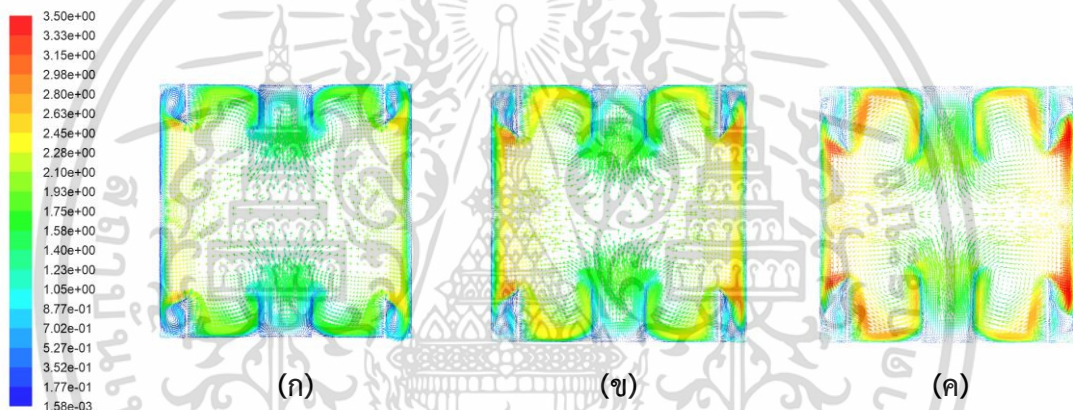


ภาพที่ 4.43 อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อกของแผ่นปีกรูปตัววีต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream)

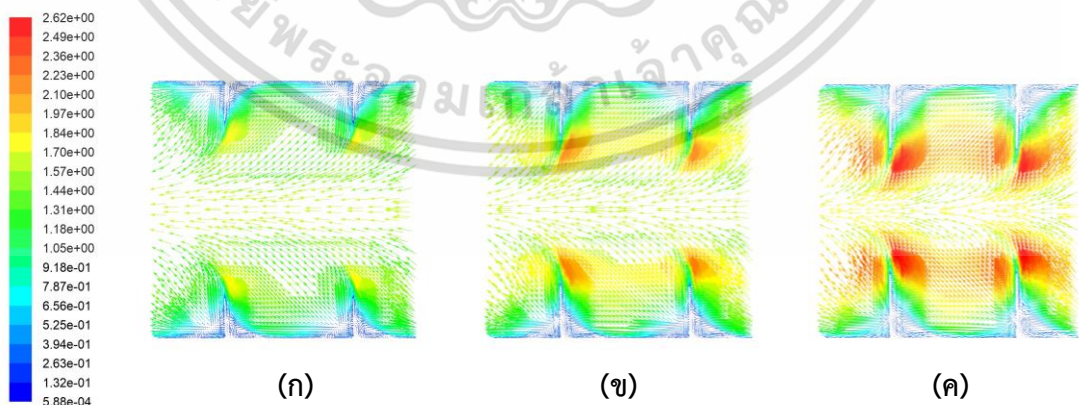
จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยเวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล ดังภาพที่ 4.45 พบว่าทุกกรณีของอัตราส่วนบล็อก ก่อให้เกิดการหมุนวนหลักบริเวณด้านหลังของแผ่นปีกรูปตัววี โดยการหมุนวนนั้นจะมีความรุนแรงสูงขึ้นตามค่าของอัตราส่วนบล็อกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกด้านของผิวท่อ พิจารณาได้จากคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ ดังภาพที่ 4.44



ภาพที่ 4.44 คอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ต์ กรณีการไหลแบบปลายวีซีตามกับกระแสการไหล (V-downstream) (ก) $BR = 0.15$, (ข) $BR = 0.2$ และ (ค) $BR = 0.25$



ภาพที่ 4.45 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีซีตามกับกระแสการไหล (V-downstream) (ก) $BR = 0.15$, (ข) $BR = 0.2$ และ (ค) $BR = 0.25$

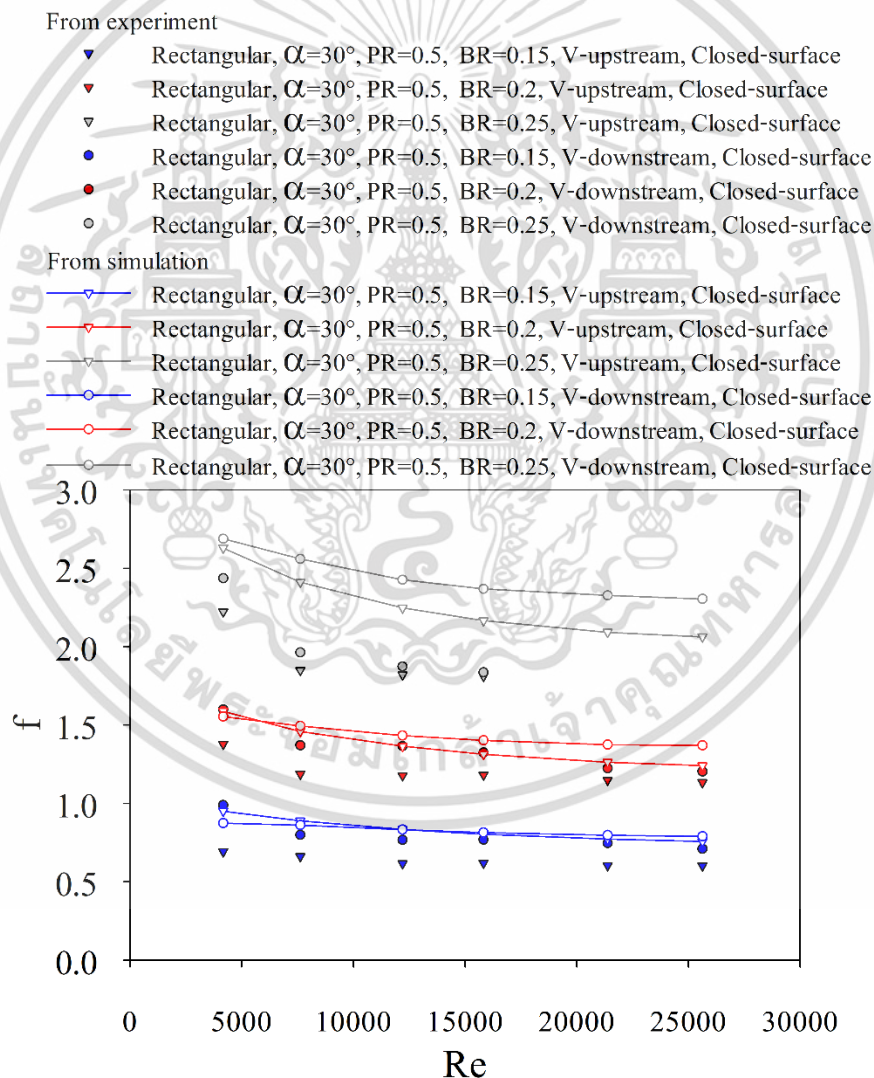


ภาพที่ 4.46 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีซีตามกับกระแสการไหล (V-downstream) (ก) $BR = 0.15$, (ข) $BR = 0.2$ และ (ค) $BR = 0.25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 ผลการศึกษาอิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหลที่มีผลต่อแผ่นปีกรูปตัววี

พิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววี รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มแบบชนิดพื้นผิวของท่อทดสอบ มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2 และ 0.25, อัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) และการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยกรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) ให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่าการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ดังภาพที่ 4.47 และ 4.48



ภาพที่ 4.47 อิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหลต่อตัวประกอบเสียดทาน

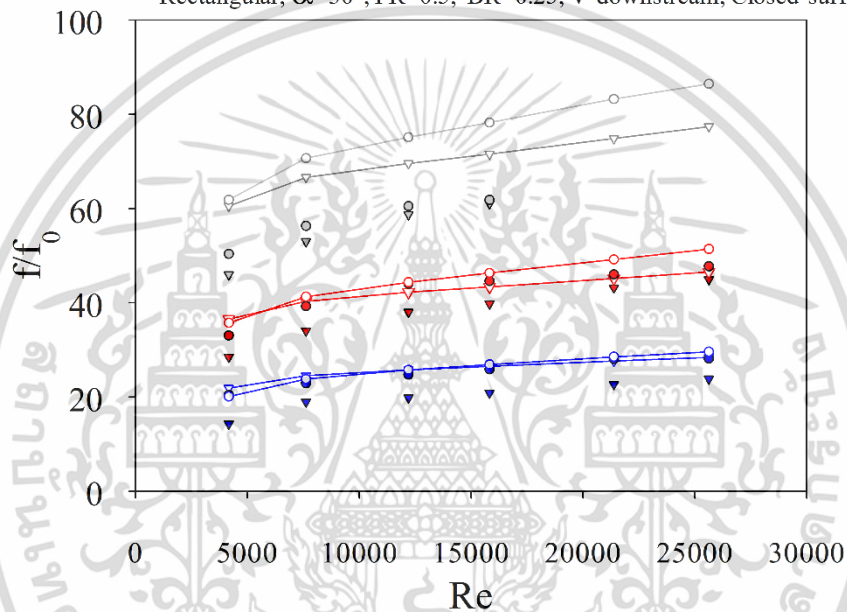
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From experiment

- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface

From simulation

- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface



ภาพที่ 4.48 อิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหลต่ออัตราส่วนตัวของประกอบเสียดทาน

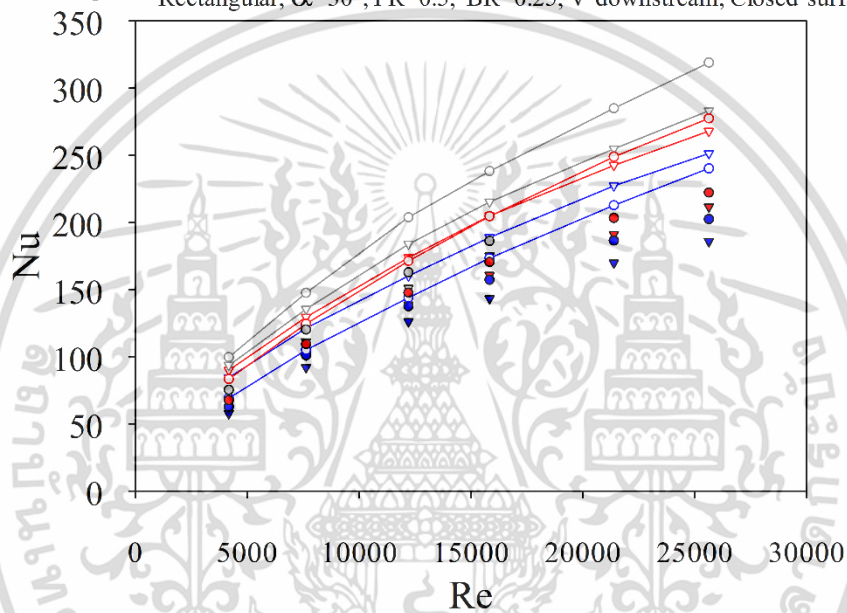
พิจารณาเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ต์ของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มแบบชิดพื้นผิวของท่อทดสอบ มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2 และ 0.25, อัตราส่วนพิทช์ เท่ากับ 0.5 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) และการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นจะทำให้เลขนัสเซลล์ต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) ให้เลขนัสเซลล์ต์มากกว่าการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ดังภาพที่ 4.49 และ 4.50

From experiment

- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface

From simulation

- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface



ภาพที่ 4.49 อธิริพลของทิศทางการไหลของของไหลต่อเลขนัสเซลต์

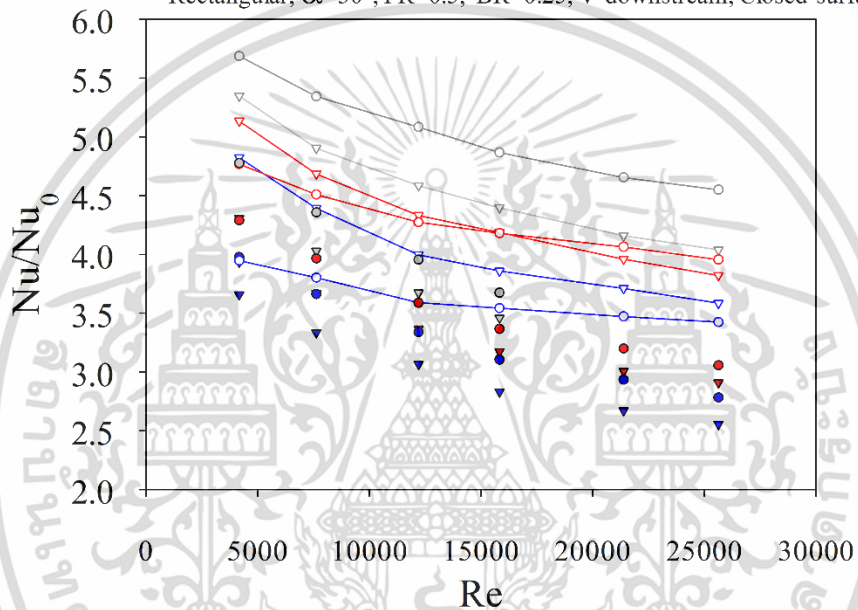
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From experiment

- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface

From simulation

- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface



ภาพที่ 4.50 อิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหลต่ออัตราส่วนของเลขนัสเซลต์

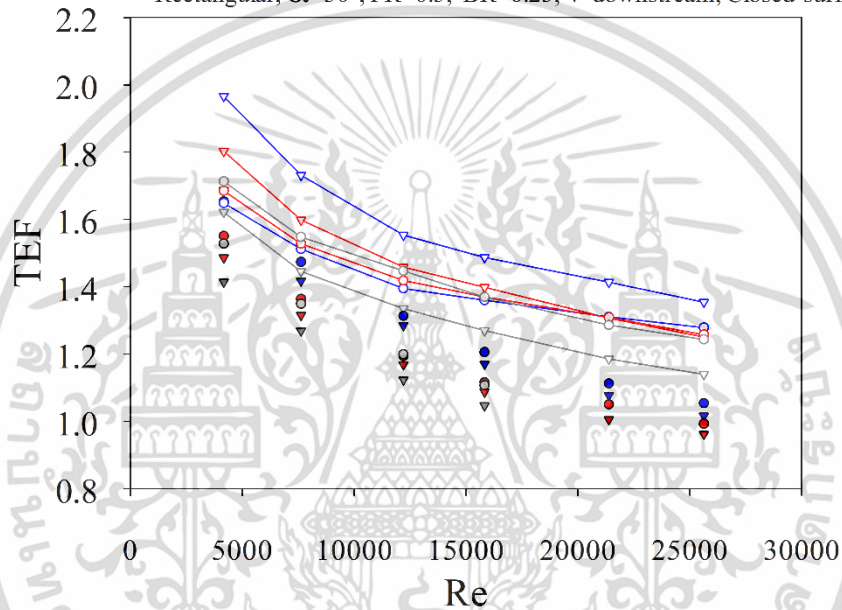
และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มแบบชิดพื้นผิวของท่อทดสอบ มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2 และ 0.25, อัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) และการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) ให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนมากกว่าการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ดังภาพที่ 4.51

From experiment

- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface

From simulation

- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- ▼ Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface



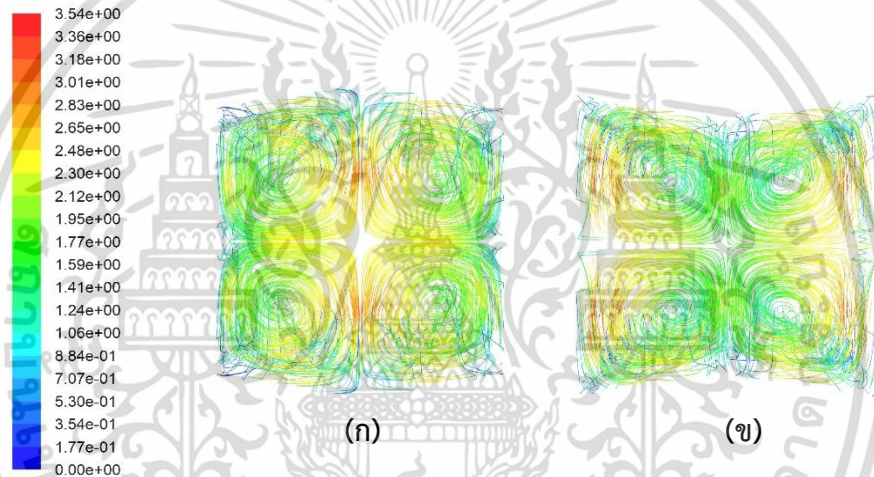
ภาพที่ 4.51 อิทธิพลของทิศทางการไหลของของไหลต่อตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยเส้นความเร็วของกระแสการไหลบนระนาบขวางทิศทางการไหล ดังภาพที่ 4.52 แสดงให้เห็นว่า ทั้งกรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) และการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) ก่อให้เกิดเส้นกระแสการไหลหมุนวนหลักที่แบ่งออกเป็น 4 แกน และจากการวิเคราะห์เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล ดังภาพที่ 4.54 เมื่อพิจารณาส่วนครึ่งล่างของท่อทดสอบ พบว่าการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) กระแสการไหลจะไหลจากบริเวณกึ่งกลางท่อลงสู่ผนังด้านล่าง เรียกว่า common-flow-down แต่การไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) กระแสการไหลจะมีทิศทางการไหลจากผนังด้านล่างขึ้นไปสู่บริเวณกึ่งกลางท่อ เรียกว่า common-flow-up

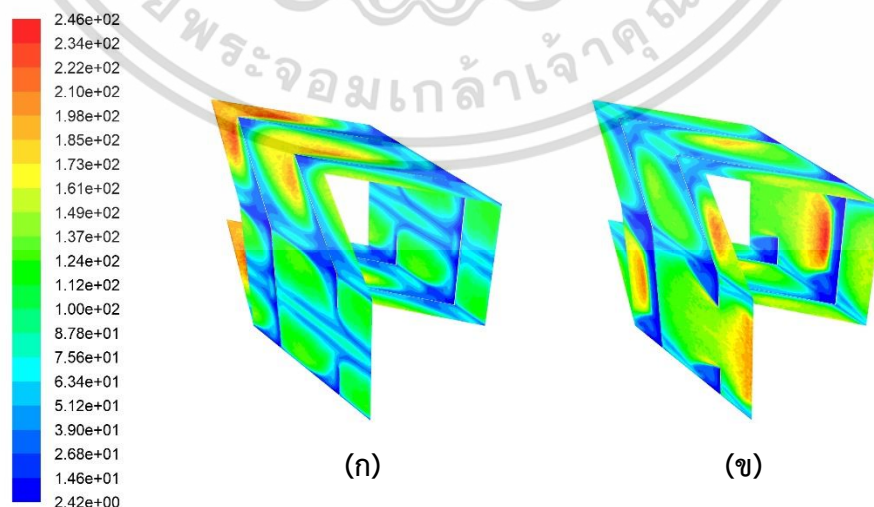
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยคอนทัวร์ของเลขนัยสเกลต์ จะพบว่ากรณีการไหลแบบปลายวีชี้ส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) มีการถ่ายเทความร้อนที่ผนังด้านบนและล่างของท่อทดสอบที่ดี เนื่องจากการหมุนวนที่มีความเร็วสูงบริเวณกลางท่อ ในขณะที่กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) จะมีการถ่ายเทความร้อนดีที่บริเวณผนังด้านข้าง (ซ้าย-ขวา) อันเนื่องจากการเกิดการหมุนวนด้วยความเร็วสูงที่บริเวณผนังท่อด้านข้าง ดังภาพที่ 4.53

และเมื่อพิจารณาลักษณะของการหมุนวนบริเวณด้านหลังของแผ่นปีกรูปตัววี ด้วยเวกเตอร์ความเร็ว พบว่ากรณีการไหลแบบปลายวีชี้ส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) การหมุนวนที่ด้านหลังของแผ่นปีกรูปตัววีมีลักษณะพุ่งเข้าหาผนังท่อด้านข้าง แต่ในกรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) การหมุนวนที่ด้านหลังของแผ่นปีกรูปตัววีจะมีความรุนแรงมากกว่าและมีลักษณะการไหลที่พุ่งเข้าหาแผ่นปีกรูปตัววี ดังภาพที่ 4.54 และภาพที่ 4.55

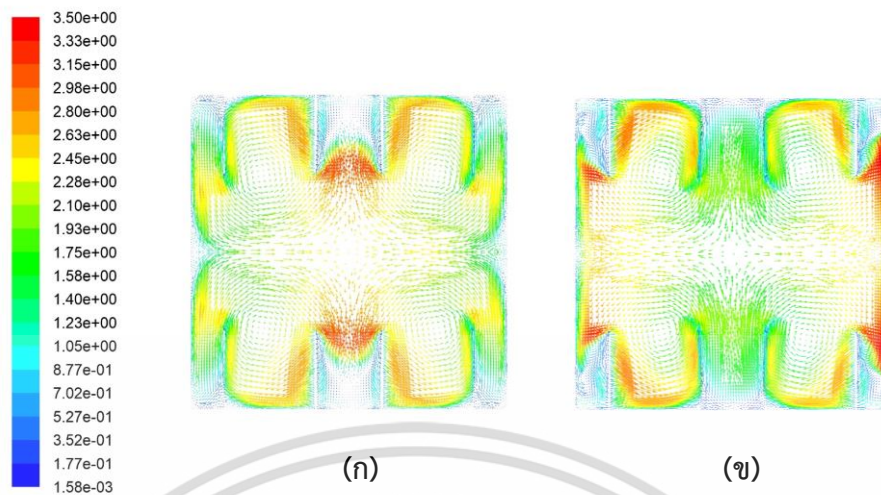


ภาพที่ 4.52 เส้นความเร็วของกระแสการไหลบนระนาบขวางทิศทางการไหล (ก) V-upstream และ (ข) V-downstream

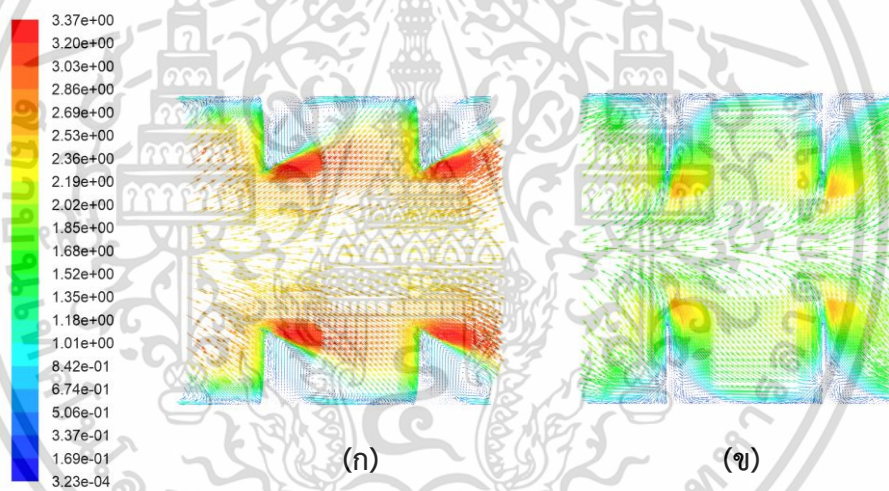


ภาพที่ 4.53 คอนทัวร์ของเลขนัยสเกลต์ (ก) V-upstream และ (ข) V-downstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.54 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล (ก) V-upstream และ (ข) V-downstream



ภาพที่ 4.55 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบทิศทางการไหล (ก) V-upstream และ (ข) V-downstream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของปีกรูปตัววี

เนื่องจากการทำการทดลองมีตัวแปรต่าง ๆ และปัจจัยภายนอกมากมายที่ไม่สามารถควบคุมให้เสถียรหรือเกิดความแม่นยำได้ เช่น สภาพอากาศภายนอกในแต่ละครั้งที่ทำการทดลอง ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ข้อจำกัดของวิธีการติดตั้งชิ้นงานทดสอบทำให้มีชิ้นส่วนอื่นเกิดขึ้นนอกเหนือจากชิ้นงานทดสอบ รวมไปถึงความแม่นยำของชิ้นงานทดสอบเพื่อให้เป็นไปตามที่ออกแบบ ซึ่งเหตุผลเหล่านี้ส่งผลให้ความสามารถในการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนน้อยกว่าที่ควรจะได้รับ

4.9.1 กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)

จากวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยแบบจำลองเมื่อมีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า หัวเต็มและสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว แบบขีดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้ส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) ที่มีอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5, 1.0 อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2, 0.25 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° พบว่าตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซิลต์ และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน แสดงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลลัพธ์ระหว่างผลการทดลองและผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขประมาณ 22.24% 24.22% และ 15.53% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.56, 4.57 และ 4.58 ตามลำดับ

และเมื่อพิจารณาแบบจำลองให้เกิดช่องว่างระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผนังท่อทดสอบ พบว่าตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซิลต์ และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลลัพธ์ระหว่างผลการทดลองและผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเมื่อเกิดช่องว่างระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผนังท่อทดสอบมีค่าลดลงเป็น 21.76% 16.78% และ 10.90% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.56, 4.57 และ 4.58 ตามลำดับ

From experiment

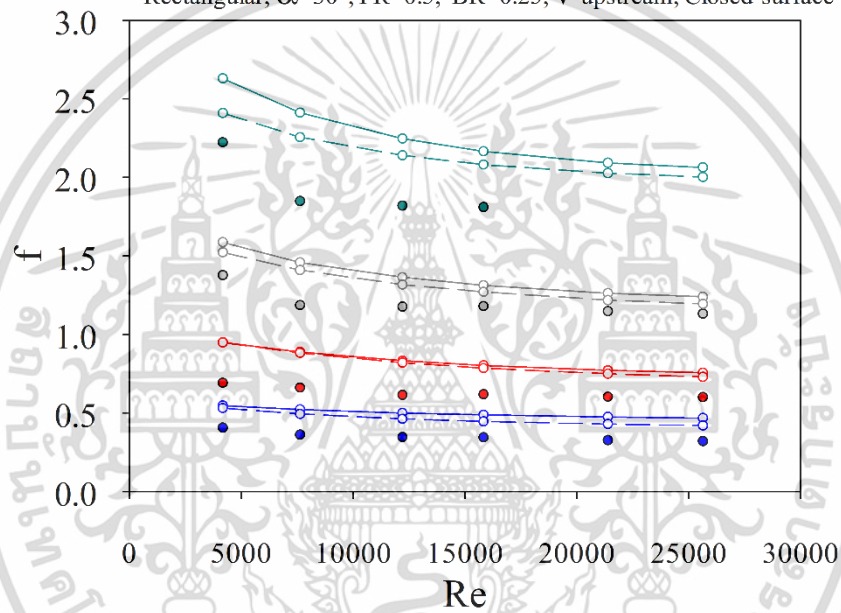
- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface

From simulation

- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface

From simulation gap 1.5 mm.

- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface



ภาพที่ 4.56 แสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานระหว่างผลจากแบบจำลองปั่นป่วน $k - \epsilon$ และผลการทดลอง กรณีการไหลแบบปลายวีชีส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From experiment

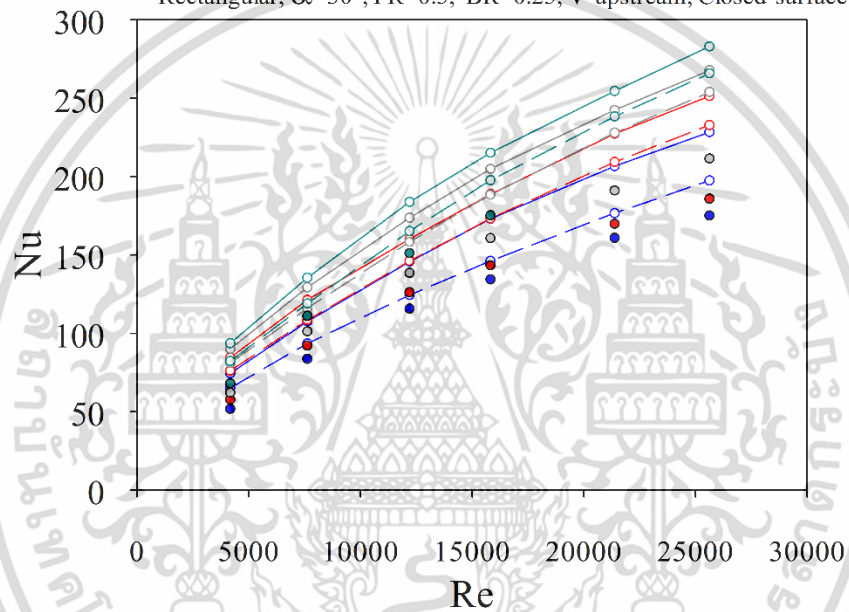
- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface

From simulation

- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface

From simulation gap 1.5 mm.

- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface



ภาพที่ 4.57 แสดงการเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ระหว่างผลจากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\varepsilon$ และผลการทดลอง กรณีการไหลแบบปลายวีขึ้นสวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From experiment

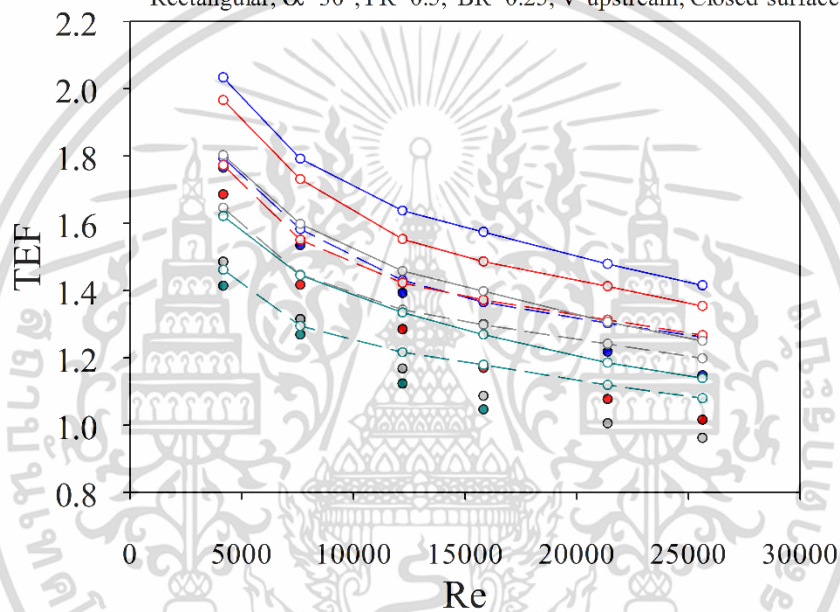
- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface

From simulation

- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface

From simulation gap 1.5 mm.

- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface



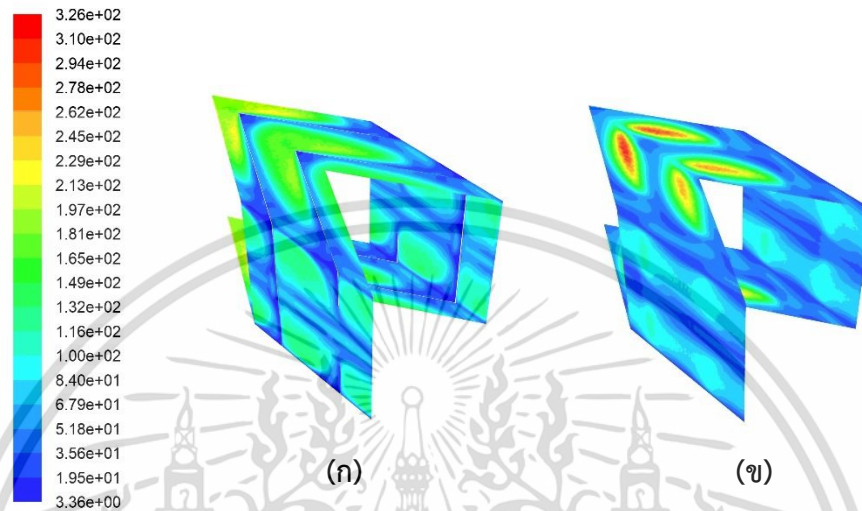
ภาพที่ 4.58 แสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนระหว่างผลจากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\epsilon$ และผลการทดลอง กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream)

จากการวิเคราะห์เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล และระนาบตามทิศทางการไหล ดังภาพที่ 4.60 และภาพที่ 4.61 แสดงให้เห็นว่าช่องว่างระหว่างแผ่นปีกรูปตัววีและผนังท่อ ก่อให้เกิดกระแสรั่วไหลผ่านและการหมุนวนขนาดเล็กที่บริเวณด้านหลังของแผ่นปีกตลอดทั้งแนวความยาวปีก ซึ่งการหมุนวนขนาดเล็กนี้ส่งผลให้ผนังด้านล่างและด้านหลังแผ่นปีกเกิดการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการหมุนวนขนาดเล็กนั้นจะรบกวนกระแสการไหลของการหมุนวนหลัก ทำให้กระแสการไหลหลักบริเวณกลางท่อตกลงสู่ผิวท่อได้ยากขึ้น รวมถึงความรุนแรงของการหมุนวนหลักนั้นจะลดลง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณผนังท่อโดยรวมลดลงด้วย พิจารณาได้

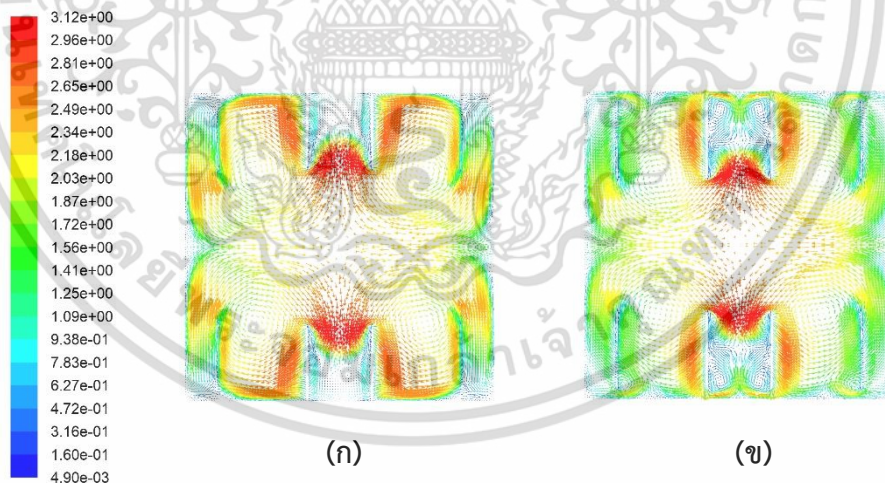
จากคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ ดังภาพที่ 4.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมีช่องว่างระหว่างแผ่นปีกรูปตัววีและผนังท่อนั้น จะส่งผลกระทบต่อที่คล้ายคลึงกันในทุกค่าของอัตราส่วนบล็อก ซึ่งทำให้ในหัวข้อการศึกษาอิทธิพลอัตราส่วนบล็อก กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) มีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันระหว่างผลจากการทดลองและผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

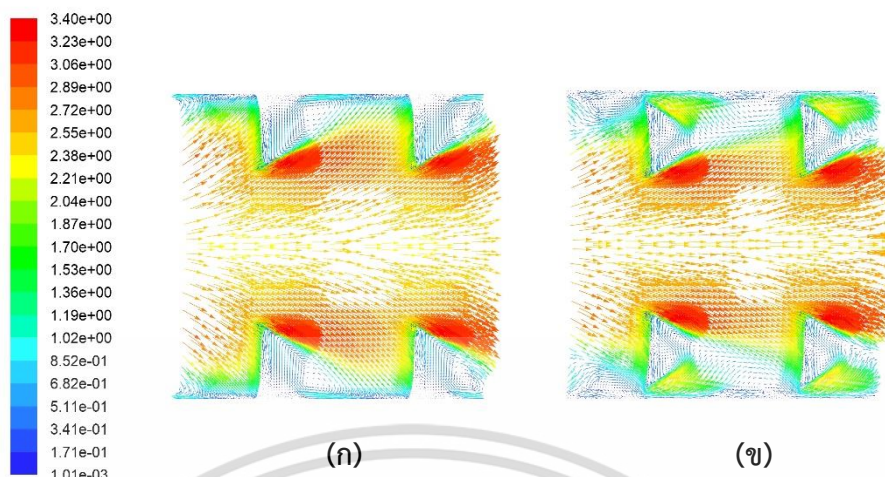


ภาพที่ 4.59 คอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ต์ กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) (ก) ไม่มีช่องว่าง และ (ข) มีช่องว่าง 1.5 mm



ภาพที่ 4.60 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) (ก) ไม่มีช่องว่าง และ (ข) มีช่องว่าง 1.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.61 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีชี้สวนทางกับ กระแสการไหล (V-upstream) (ก) ไม่มีช่องว่าง และ (ข) มีช่องว่าง 1.5 mm

4.9.2 กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream)

จากวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยแบบจำลองเมื่อมีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า หัวเต็มแบบขีดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream) ที่มีอัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2, 0.25 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° พบว่าตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซิลต์ และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน แสดงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลลัพธ์ระหว่างผลจากการทดลองและผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขประมาณ 12.27% 19.11% และ 15.61% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.41, 4.42 และ 4.43 ตามลำดับ

และเมื่อพิจารณาแบบจำลองให้เกิดช่องว่างระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผนังท่อทดสอบ พบว่าตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซิลต์ และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลลัพธ์ระหว่างผลจากการทดลองและผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเมื่อเกิดช่องว่างระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผนังท่อทดสอบมีค่าลดลงเป็น 7.39% 16.29% และ 14.36% ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.41, 4.42 และ 4.43 ตามลำดับ

From experiment

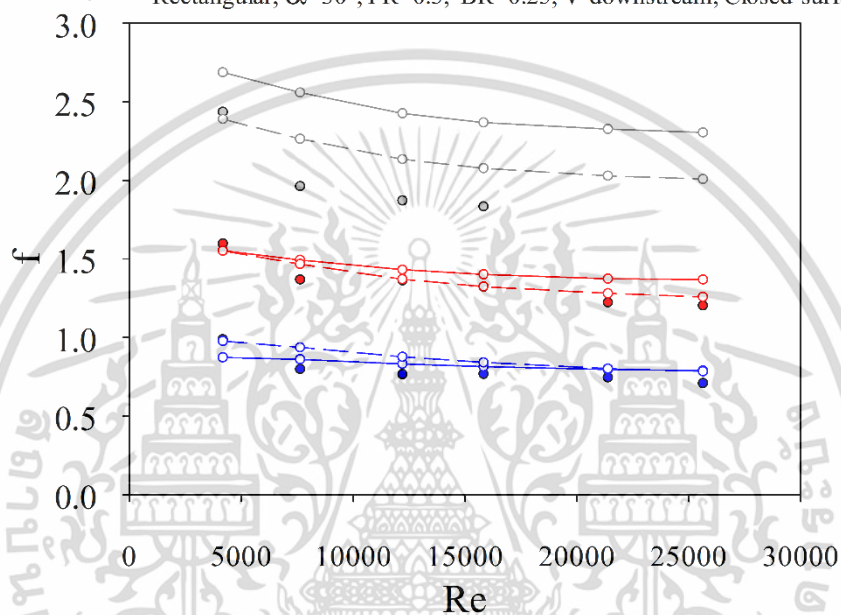
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface

From simulation

- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface

From simulation gap 1.5 mm.

- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface



ภาพที่ 4.62 แสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานระหว่างผลจากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\varepsilon$ และผลการทดลอง กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream)

From experiment

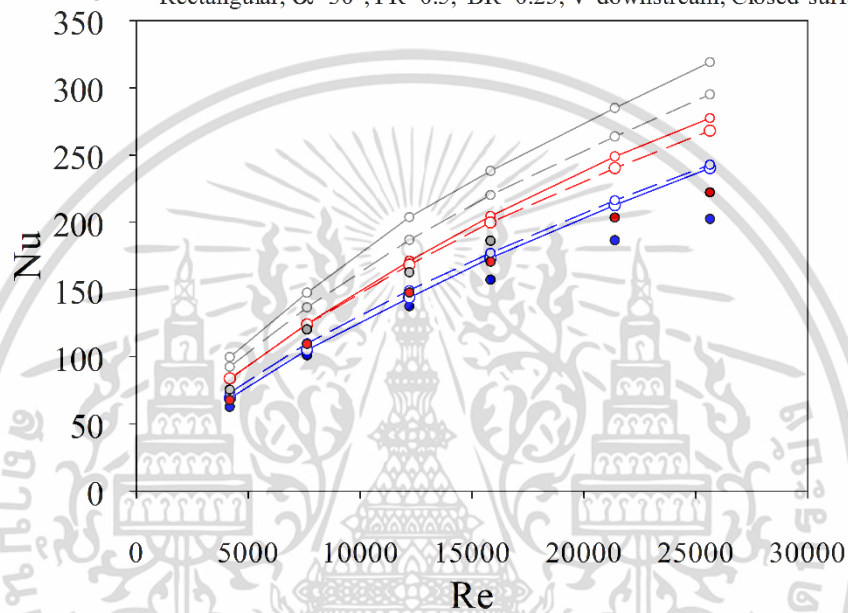
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface

From simulation

- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface

From simulation gap 1.5 mm.

- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface



ภาพที่ 4.63 แสดงการเปรียบเทียบเลขนัสเซลต์ระหว่างผลจากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\varepsilon$ และผลการทดลอง กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From experiment

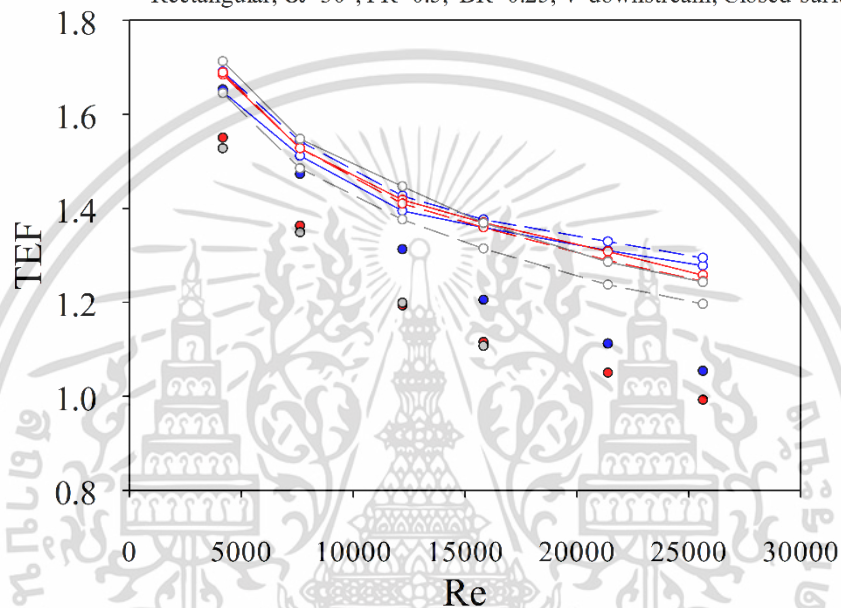
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface

From simulation

- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface

From simulation gap 1.5 mm.

- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed-surface

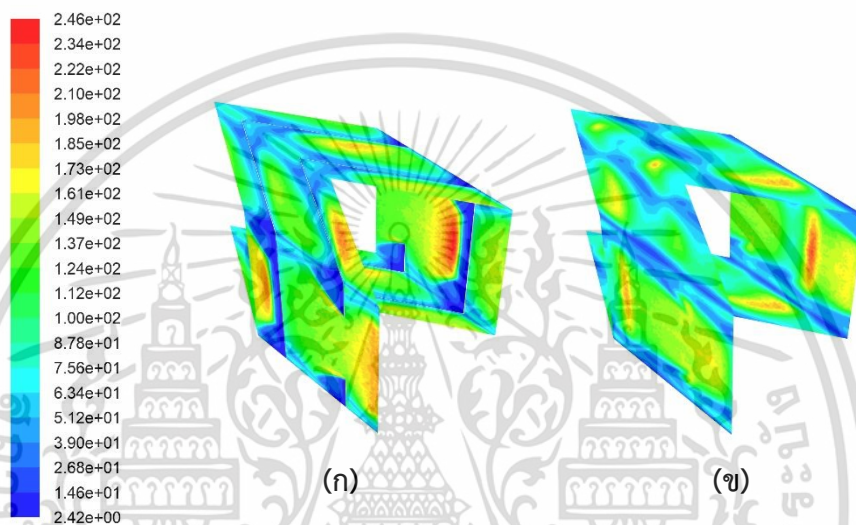


ภาพที่ 4.64 แสดงการเปรียบเทียบตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนระหว่างผลจากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\varepsilon$ และผลการทดลอง กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกับกระแสการไหล (V-downstream)

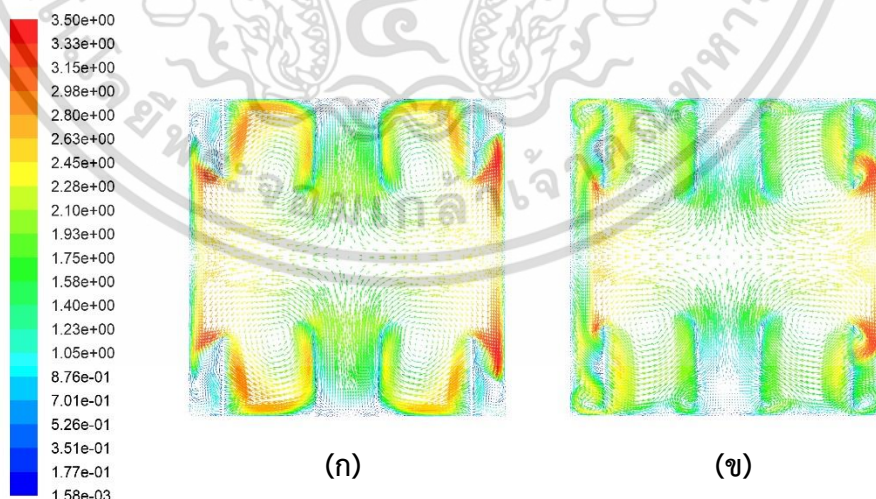
จากการวิเคราะห์เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล และระนาบตามทิศทางการไหล ดังภาพที่ 4.66 และภาพที่ 4.67 แสดงให้เห็นว่าช่องว่างระหว่างแผ่นปีกรูปตัววีและผนังท่อ ก่อให้เกิดกระแสรั่วไหลผ่านและการหมุนวนขนาดเล็กที่บริเวณด้านหลังของแผ่นปีกตลอดทั้งแนวความยาว ซึ่งการหมุนวนขนาดเล็กนี้ส่งผลให้ผนังด้านล่างและด้านหลังแผ่นปีกเกิดการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการหมุนวนขนาดเล็กนั้นจะรบกวนกระแสการไหลของการหมุนวนหลัก ทำให้กระแสการไหลหลักบริเวณกลางท่อตกลงสู่ผิวท่อได้ยากขึ้น รวมถึงความรุนแรงของการหมุนวนหลักนั้นลดลง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณผนังท่อโดยรวมลดลงด้วย พิจารณาได้จากคอนทัวร์ของเลขนัสเซลต์ ดังภาพที่ 4.65

การรบกวนที่เกิดจากการหมุนวนขนาดเล็กนี้ ส่งผลกระทบต่อมากเมื่ออัตราส่วนบล็อกมีค่าสูง หรือความรุนแรงของการหมุนวนหลักสูง แต่จะส่งผลกระทบต่อลดลงเมื่ออัตราส่วนบล็อกมีค่าต่ำหรือมีความรุนแรงของการหมุนวนหลักต่ำ ส่งผลให้ในกรณีที่มีช่องว่าง เมื่ออัตราส่วนบล็อกมีค่าสูงขึ้น ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนจะมีค่าลดลง

จากการวิเคราะห์การไหลที่มีช่องว่างระหว่างแผ่นปีกรูปตัววีและผนังท่อนี้ ทำให้สามารถอธิบายความขัดแย้งระหว่างผลจากการทดลองและผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ในหัวข้อการศึกษา อิทธิพลของอัตราส่วนบล็อก ของกรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามการไหล (V-downstream) ได้

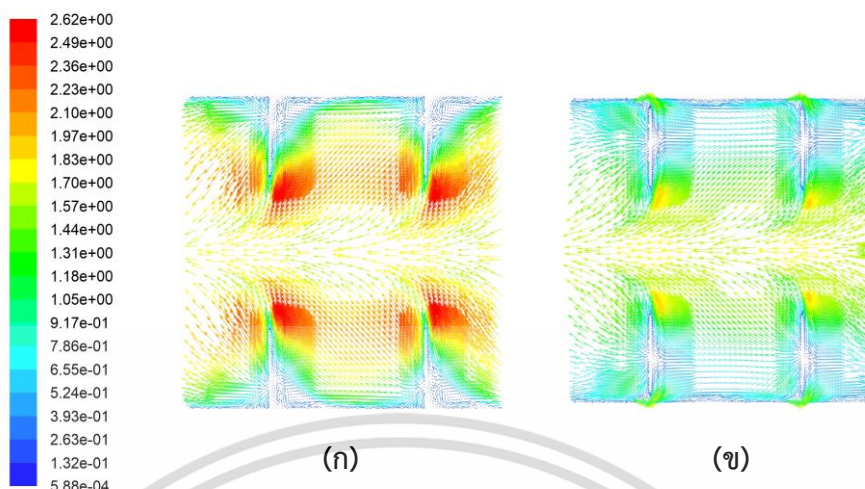


ภาพที่ 4.65 คอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) (ก) ไม่มีช่องว่าง และ (ข) มีช่องว่าง 1.5 mm



ภาพที่ 4.66 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีชี้ตามกระแสการไหล (V-downstream) (ก) ไม่มีช่องว่าง และ (ข) มีช่องว่าง 1.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

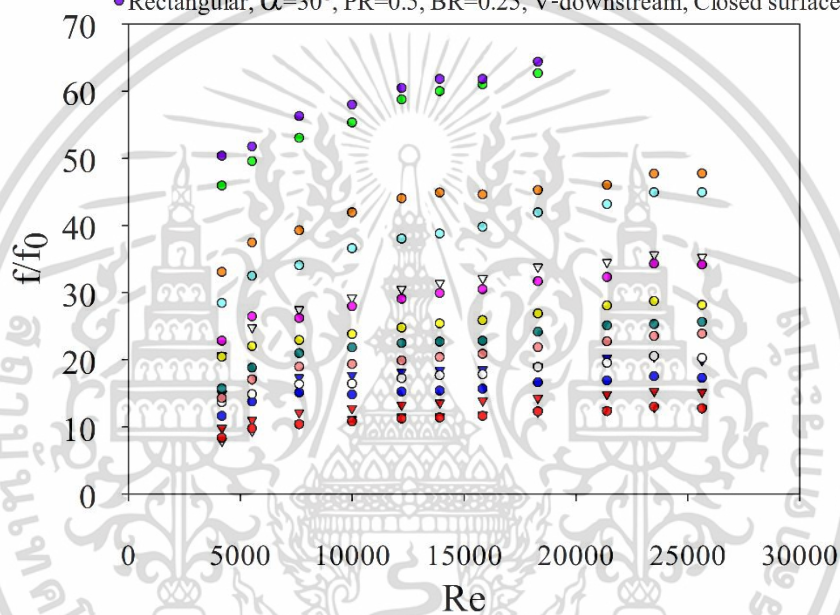


ภาพที่ 4.67 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล กรณีการไหลแบบปลายวีซีตาม กระแสการไหล (V-downstream) (ก) ไม่มีช่องว่าง และ (ข) มีช่องว่าง 1.5 mm

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์ และอัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทาน กรณีการไหลแบบปลายวีซีส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) และการไหลแบบปลายวีซีตามกระแสการไหล (V-downstream) เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงต่าง ๆ ตามแนวเส้นทแยงมุมและแบบชิดพื้นผิวของท่อทดสอบ มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2 และ 0.25, อัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ที่มุมปะทะ เท่ากับ 30° และ 45° พบว่ากรณีที่มีอัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด คือ แผ่นปีกรูปตัววีในรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มแบบปลายวีซีตามกระแสการไหล (V-downstream) ที่มีการติดตั้งแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบ อัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5, อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.25 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° โดยมีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีผนังเรียบเท่ากับ 58.137 ดังภาพที่ 4.68

- ▼ Trapezoidal, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Diagonal
- ▽ Trapezoidal, $\alpha=45^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Diagonal
- ▽ Triangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Diagonal
- ▼ Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Diagonal
- Trapezoidal, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed surface
- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed surface
- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed surface

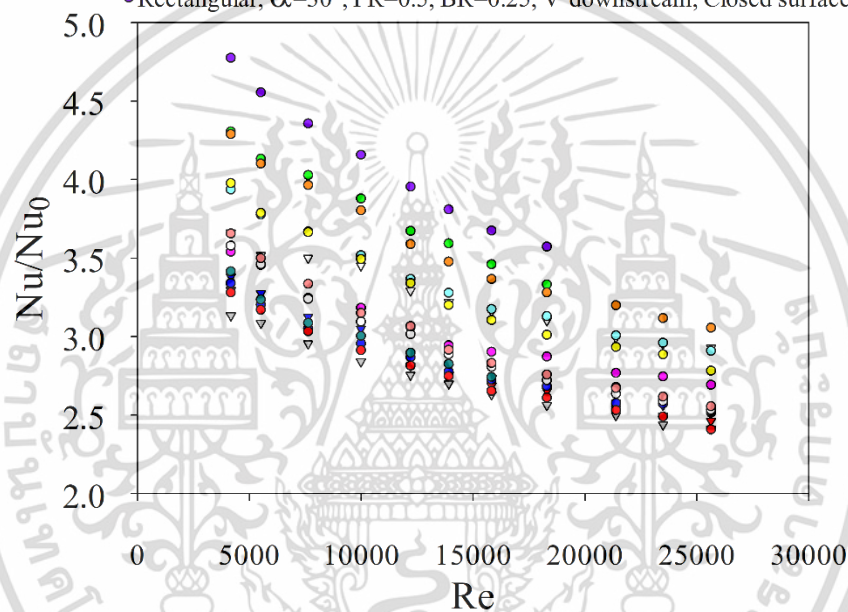


ภาพที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และอัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทาน

พิจารณาค่าความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์ และอัตราส่วนของเลขนัสเซลล์ต์ กรณีการไหลแบบปลายวิชีส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) และการไหลแบบปลายวิชีตามกระแสการไหล (V-downstream) เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปร่างต่าง ๆ ตามแนวเส้นทแยงมุมและแบบชิดพื้นผิวของท่อทดสอบ มีอัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.15, 0.2 และ 0.25, อัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ที่มุมปะทะ เท่ากับ 30° และ 45° พบว่ากรณีที่มีอัตราส่วนของเลขนัสเซลล์ต์มากที่สุด คือ แผ่นปีกรูปตัววีในรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าหัวเต็มแบบปลายวิชีตามกระแสการไหล (V-downstream) ที่มีการติดตั้งแบบชิดพื้นผิวท่อทดสอบ อัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5, อัตราส่วนบล็อก เท่ากับ 0.25 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° โดยมีเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยมากกว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีผนังเรียบเท่ากับ 4.108 ดังภาพที่ 4.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ▼ Trapezoidal, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Diagonal
- ▽ Trapezoidal, $\alpha=45^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Diagonal
- ▽ Triangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Diagonal
- ▼ Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Diagonal
- Trapezoidal, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed surface
- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.15, V-upstream, Closed surface
- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=1, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Discrete-Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-upstream, Closed surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-upstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.15, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.2, V-downstream, Closed-surface
- Rectangular, $\alpha=30^\circ$, PR=0.5, BR=0.25, V-downstream, Closed surface



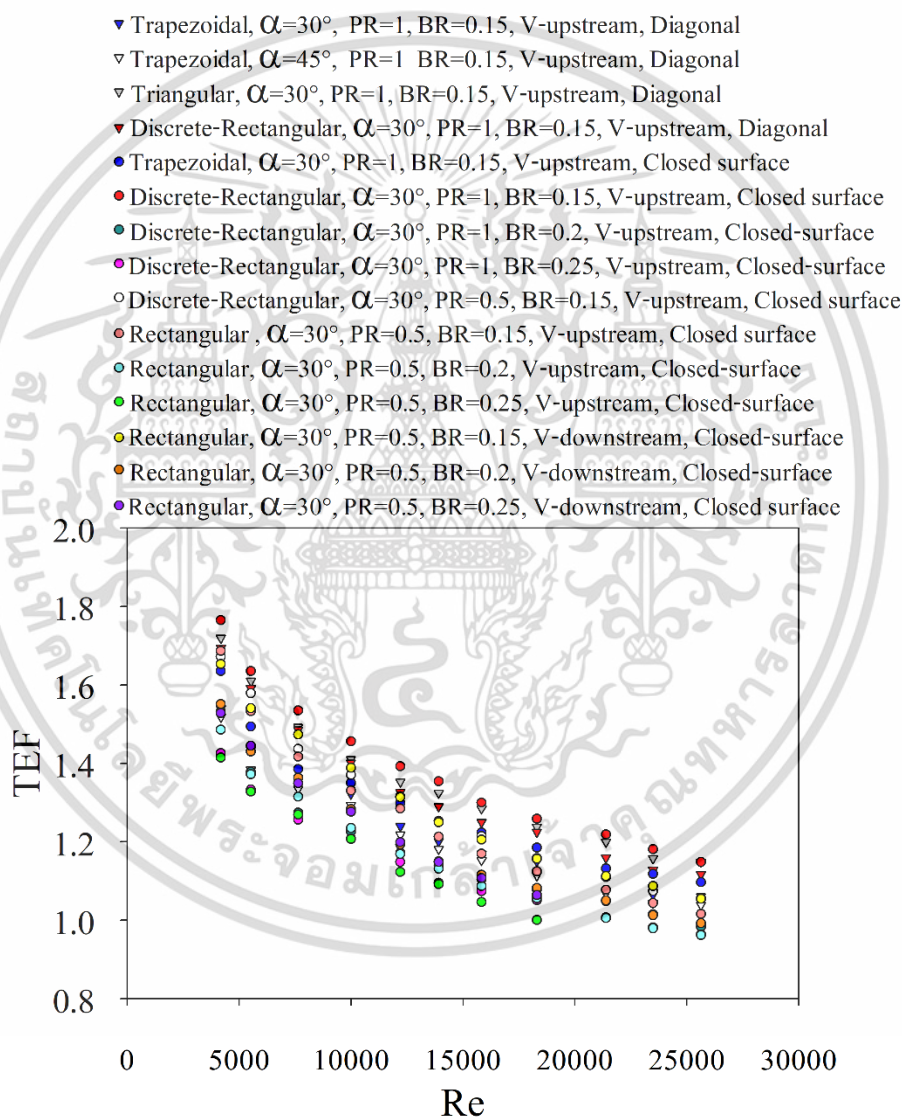
ภาพที่ 4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และอัตราส่วนของเลขนัสเซลต์

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์ และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส กรณีการไหลแบบปลายวีชีส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) และการไหลแบบปลายวีชีตามกระแสการไหล (V-downstream) เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงต่าง ๆ ตามแนวเส้นทแยงมุมและแบบชิดพื้นผิวของท่อทดสอบ มีอัตราส่วนบล็อกรเท่ากับ 0.15, 0.2 และ 0.25, อัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ที่มุมปะทะ เท่ากับ 30° และ 45° พบว่าทุกกรณีที่มีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววี ให้ผลของค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนที่ติดลอดช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ส์ที่ทดสอบโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.185-1.386

จากการทดลองภายใต้เงื่อนไขการศึกษานี้ พบว่ากรณีที่มีตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด คือกรณีแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัว ติดตั้งแบบชิดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยปลายวีชีส่วนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) อัตราส่วนพิตช์ เท่ากับ 1, อัตราส่วนบล็อกรเท่ากับ 0.15, อัตราส่วนมุมปะทะ เท่ากับ 30° และ 45° อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้มีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในครั้งต่อไป

บล็อก เท่ากับ 0.15 และมุมปะทะ เท่ากับ 30° โดยมีค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด เท่ากับ 1.765 ดังภาพที่ 4.70

จากการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่าความสมบูรณ์ของชิ้นงานทดสอบและการติดตั้งชิ้นงานในท่อทดสอบส่งผลต่อความสามารถของการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน ดังนั้นถ้าสามารถลดข้อด้อยในจุดเหล่านี้ได้จะสามารถดึงสมรรถภาพของชิ้นงานทดสอบได้มากขึ้นโดยเกิดการสูญเสียของพลังงานในระบบที่น้อยลง หรือกรณีที่มีตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดจากผลการทดลองอาจมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.765 – 2.034



ภาพที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11 การพัฒนาและปรับปรุงแผ่นปีกรูปตัววีในรูปแบบต่าง ๆ

จากการศึกษาค้นคว้าเมื่อมีการการติดตั้งแผ่นกั้นการไหลรูปตัววีในทุกรูปแบบ สามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนได้ดีมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อต้องการให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนมาก ค่าตัวประกอบเสียดทานก็มากขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาและปรับปรุงแผ่นปีกรูปตัววีในรูปแบบต่าง ๆ ต่อไปนี้ โดยจะพิจารณาด้วยผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ด้วยการเจาะช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าบริเวณพื้นผิวของแผ่นปีกรูปตัววีด้วยขนาดและอัตราส่วนที่เหมาะสม ดังภาพที่ 4.71 โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันตกคร่อมที่จะส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานลดลง

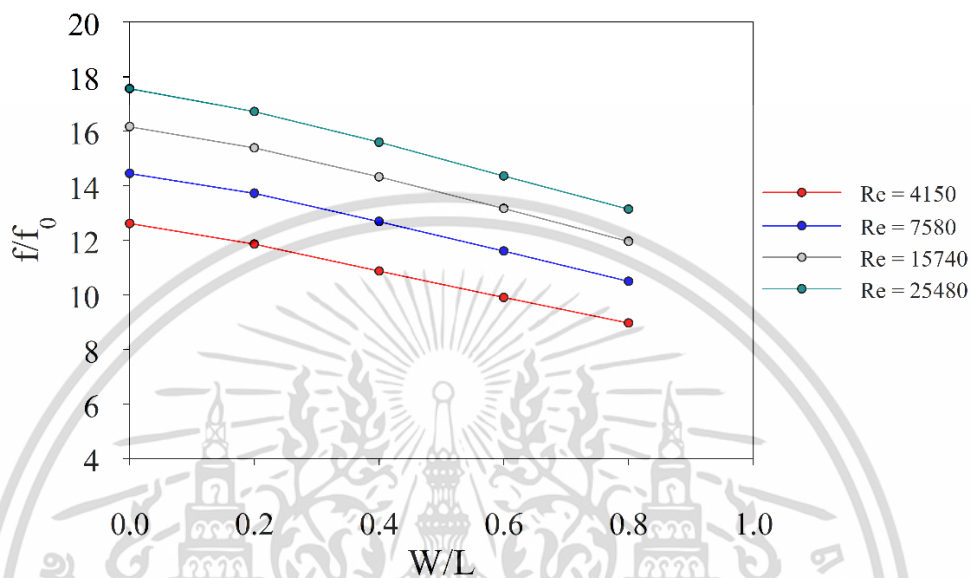


ภาพที่ 4.71 ภาพด้านหน้าของแผ่นปีกรูปตัววีเมื่อการเจาะช่องสี่เหลี่ยม

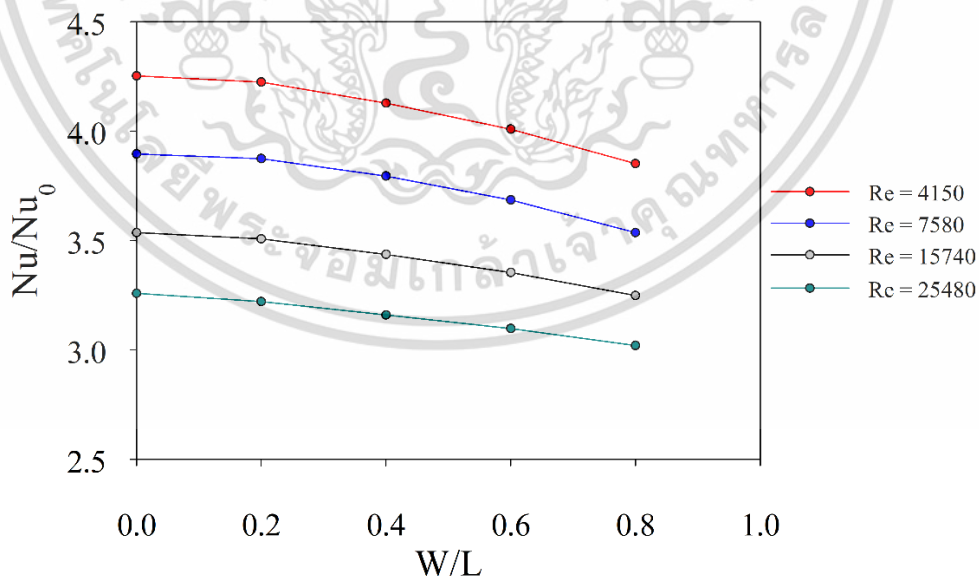
เมื่อ

- L คือ ความยาวของแผ่นปีกรูปตัววี
- H คือ ความสูงของแผ่นปีกรูปตัววี
- W คือ ความกว้างของช่องเจาะสี่เหลี่ยม
- V คือ ความสูงของช่องเจาะสี่เหลี่ยม

จากการศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างแผ่นปีกรูปตัววีที่ไม่มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม และมีการเจาะช่องสี่เหลี่ยมขนาดต่าง ๆ เมื่อให้อัตราส่วนความสูงของช่องเจาะมีค่าคงที่ พบว่าขนาดความยาวของช่องเจาะสี่เหลี่ยมที่มีค่า W/L หรือมีอัตราส่วนระหว่างความยาวของช่องเจาะสี่เหลี่ยมต่อความยาวของแผ่นปีกรูปวี เท่ากับ 0.4 ให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนดีที่สุด ดังภาพที่ 4.74

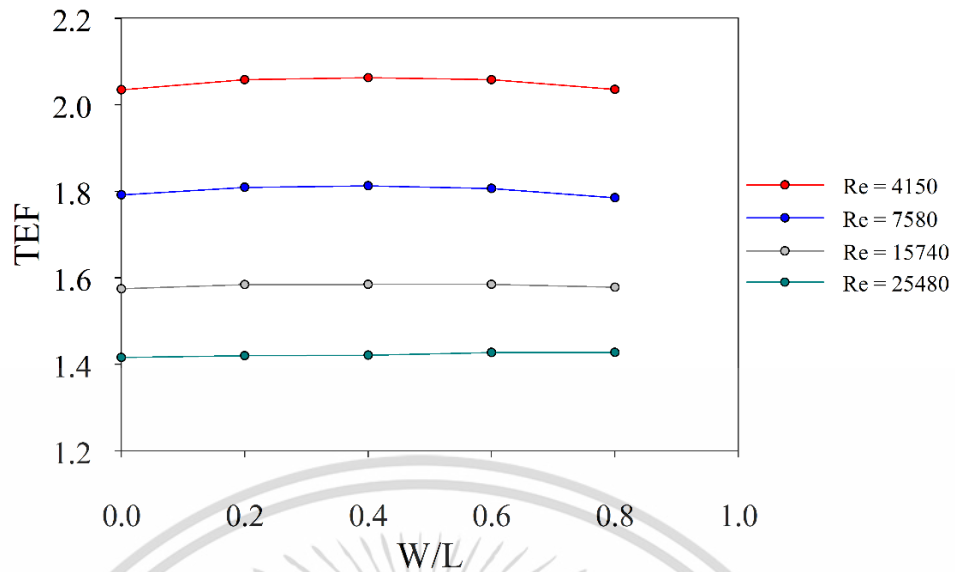


ภาพที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่าง W/L และอัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทานที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่าง ๆ เมื่อ $V/H = 0.25$



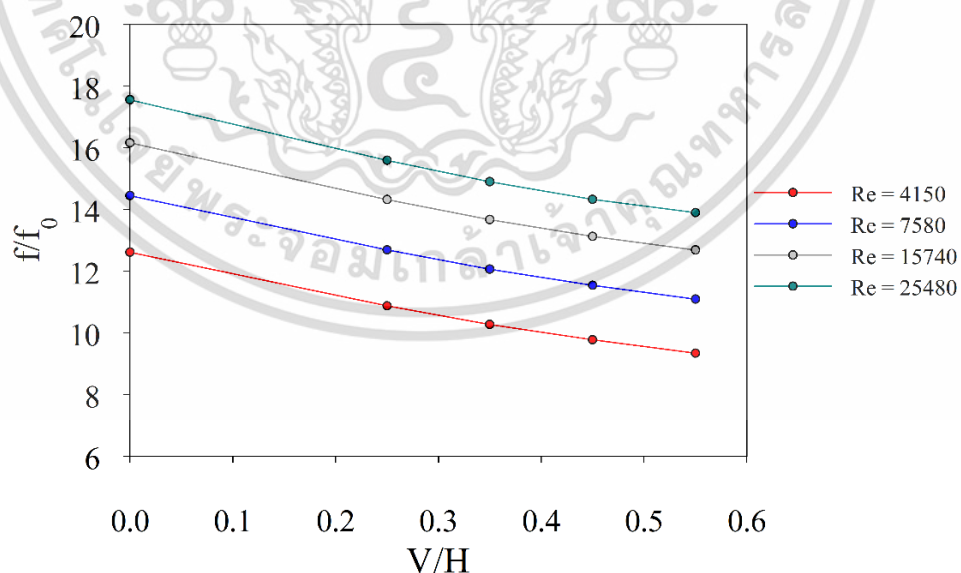
ภาพที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่าง W/L และอัตราส่วนของเลขนัสเซิลต์ที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่าง ๆ เมื่อ $V/H = 0.25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



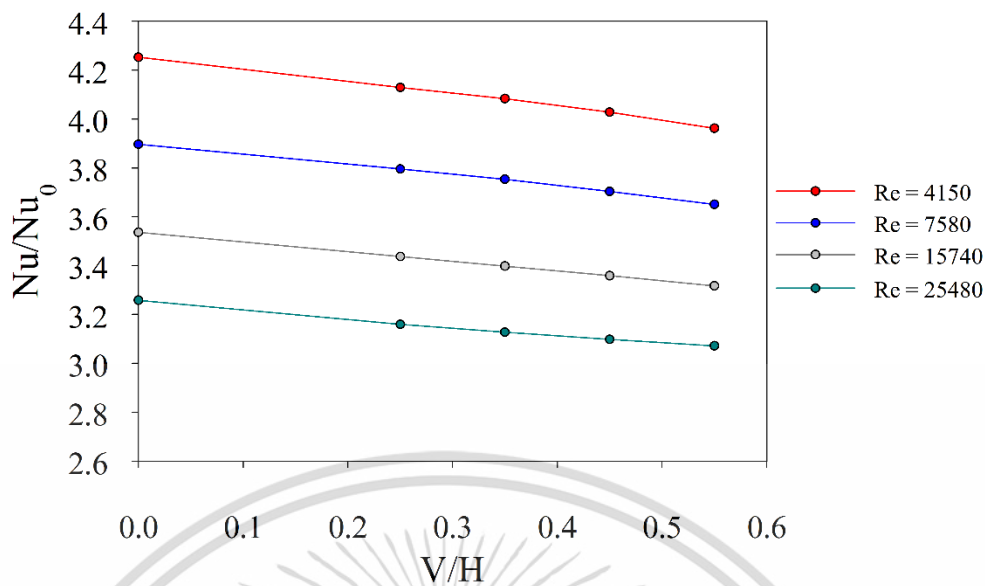
ภาพที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่าง W/L และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่าง ๆ เมื่อ $V/H = 0.25$

จากการศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างแผ่นปีกรูปตัววีที่ไม่มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม และมีการเจาะช่องสี่เหลี่ยมขนาดต่าง ๆ เมื่อให้อัตราส่วนความยาวของช่องเจาะมีค่าคงที่ พบว่าขนาดความสูงของช่องเจาะสี่เหลี่ยมที่มีค่า V/H หรือมีอัตราส่วนระหว่างความสูงของช่องเจาะสี่เหลี่ยมต่อความสูงของแผ่นปีกรูปวี เท่ากับ 0.45 ให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด ดังภาพที่ 4.77

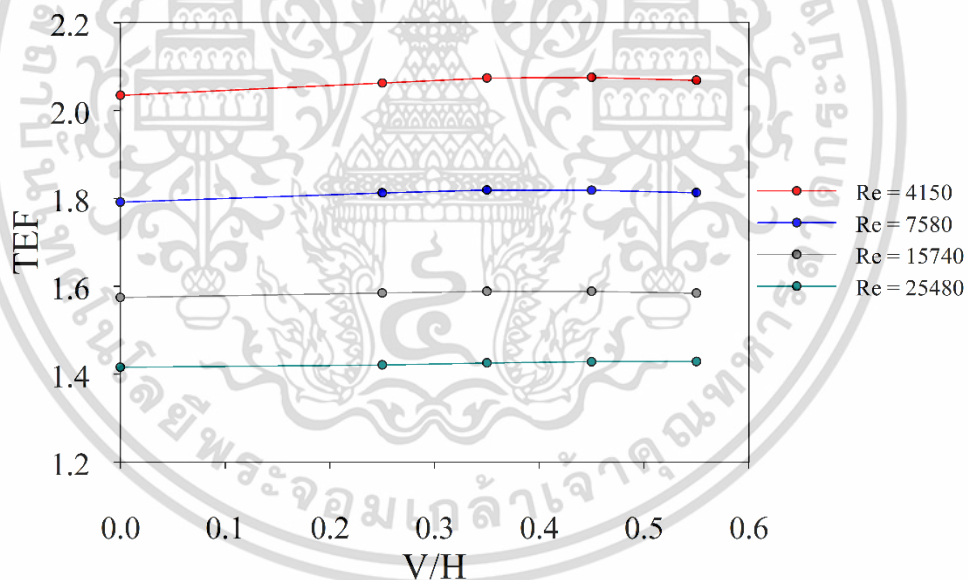


ภาพที่ 4.75 ความสัมพันธ์ระหว่าง V/H และอัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทานที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่าง ๆ เมื่อ $W/L = 0.4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



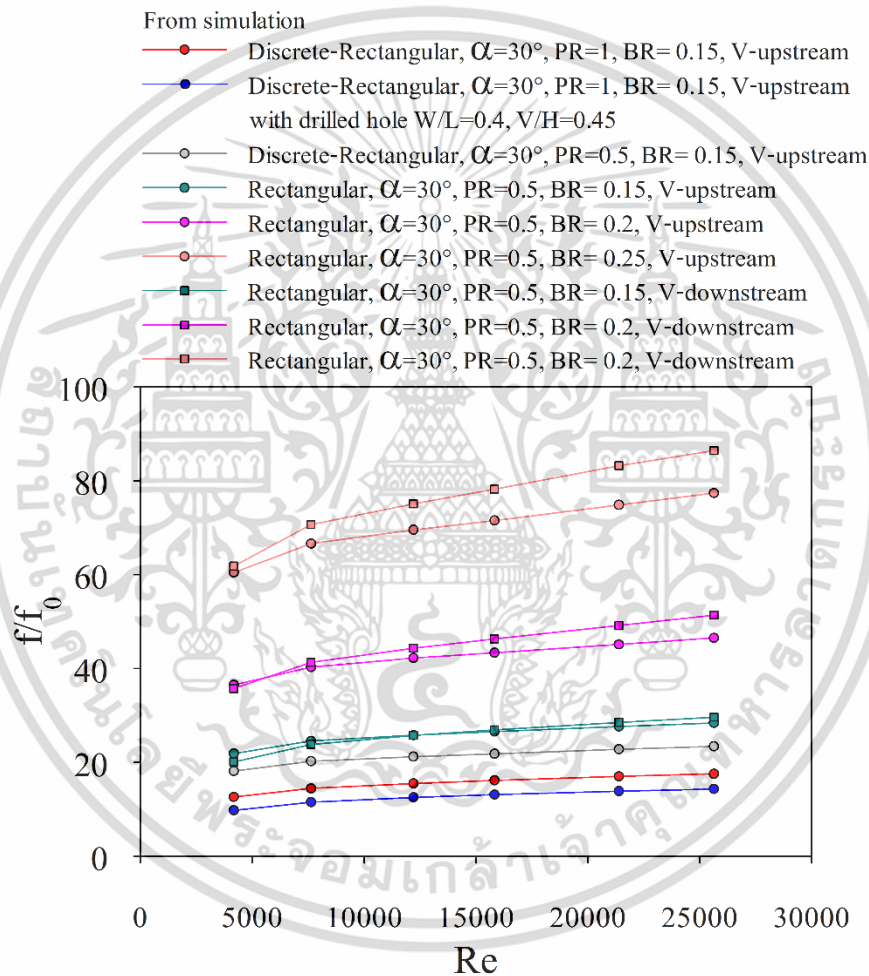
ภาพที่ 4.76 ความสัมพันธ์ระหว่าง V/H และอัตราส่วนของเลขนัสเซิลต์ที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่าง ๆ เมื่อ $W/L = 0.4$



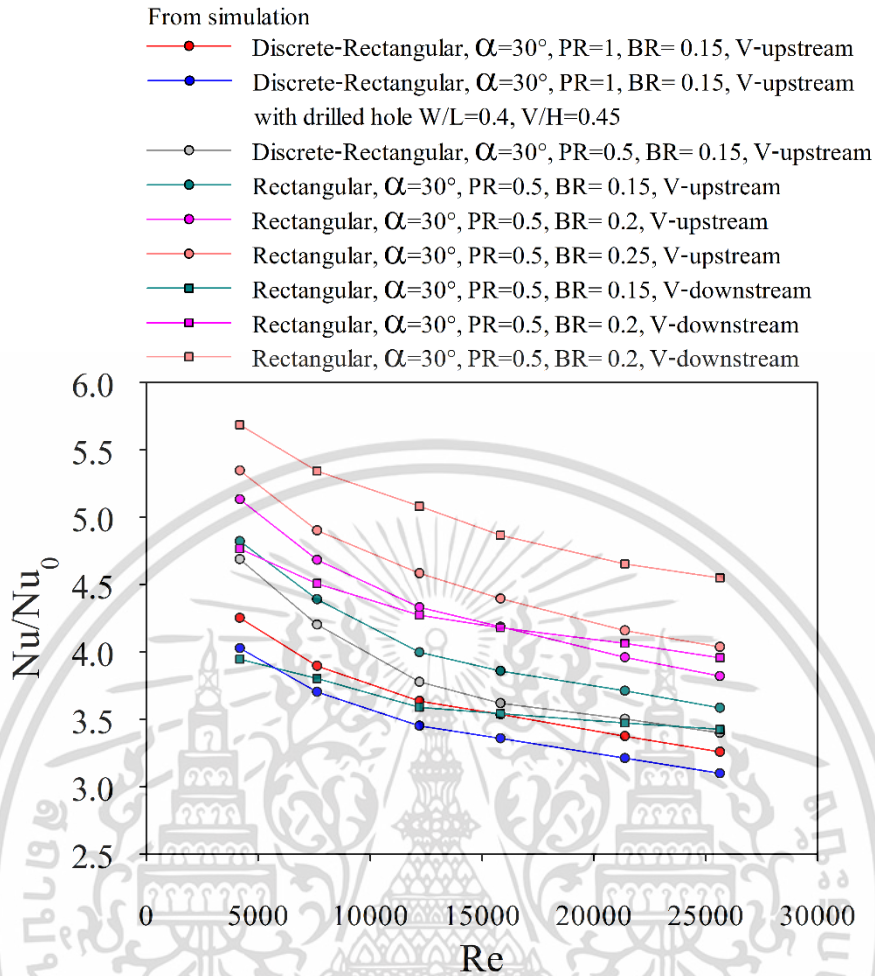
ภาพที่ 4.77 ความสัมพันธ์ระหว่าง V/H และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่าง ๆ เมื่อ $W/L = 0.4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งนั้นการพัฒนาและปรับปรุงแผ่นปีกรูปตัววีในรูปแบบต่าง ๆ ด้วยผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่าการเจาะช่องสี่เหลี่ยมบนพื้นผิวของแผ่นปีกรูปตัววี ด้วยขนาดความยาวของช่องเจาะสี่เหลี่ยมที่มีค่า W/L หรือมีอัตราส่วนระหว่างความยาวของช่องเจาะสี่เหลี่ยมต่อความยาวของแผ่นปีกรูปวี เท่ากับ 0.4 และขนาดความสูงของช่องเจาะสี่เหลี่ยมที่มีค่า V/H หรือมีอัตราส่วนระหว่างความสูงของช่องเจาะสี่เหลี่ยมต่อความสูงของแผ่นปีกรูปวี เท่ากับ 0.45 ให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนเฉลี่ย เท่ากับ 1.6765 และสูงสุดเท่ากับ 2.0754 หรือมากกว่ากรณีที่ไม่มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม ดังภาพที่ 4.80

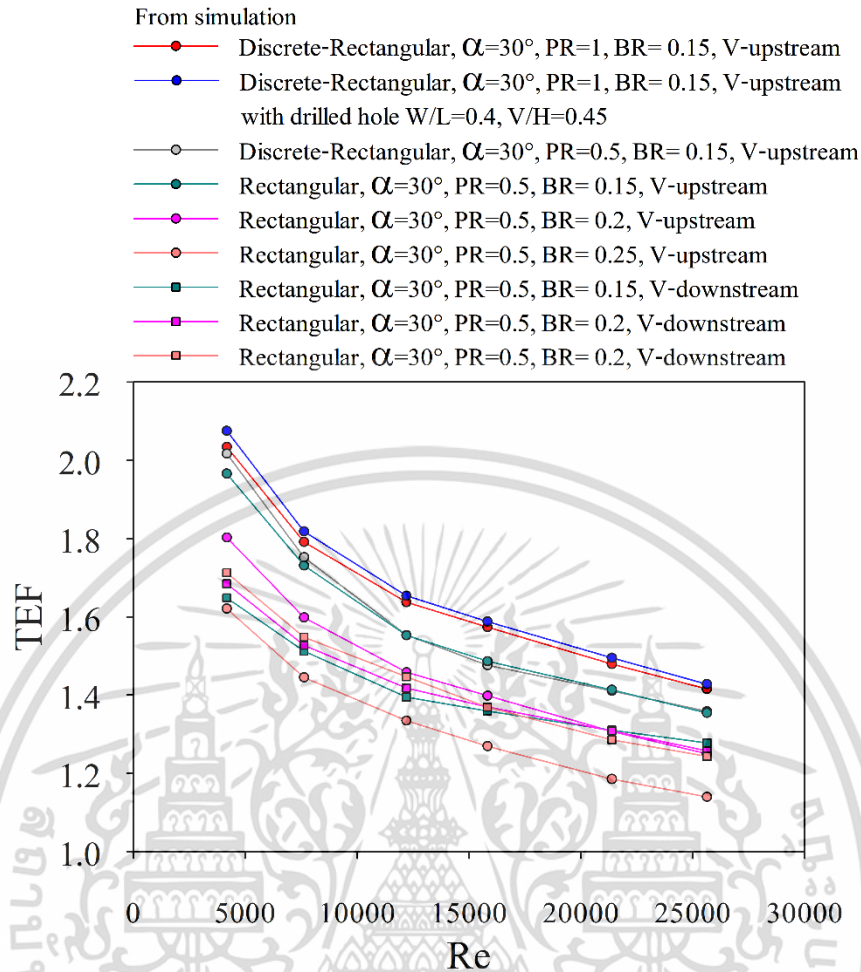


ภาพที่ 4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และอัตราส่วนของตัวประกอบเสียดทานจากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\varepsilon$



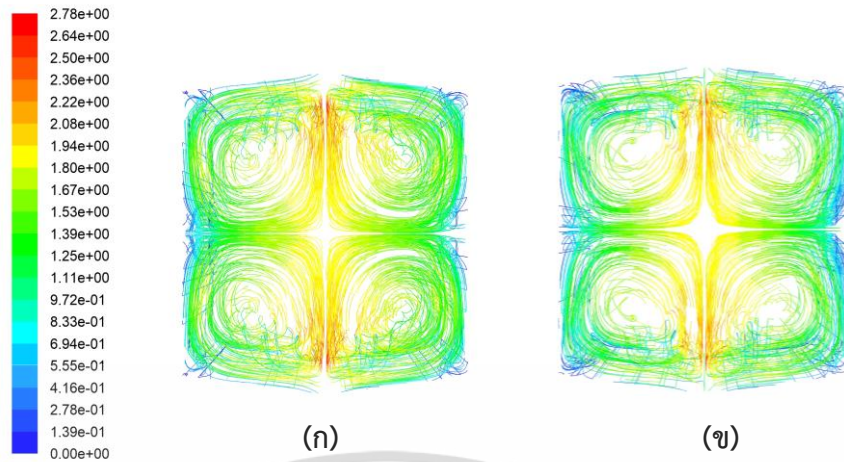
ภาพที่ 4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และอัตราส่วนของเลขนัสเซิลต์จากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\varepsilon$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

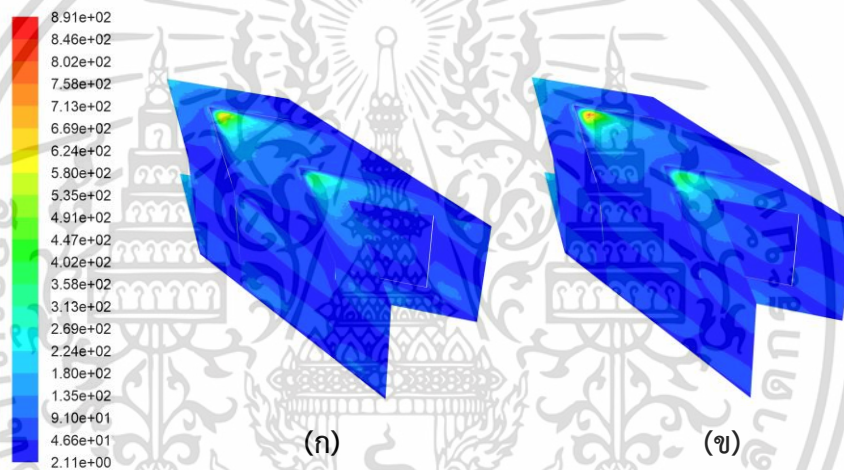


ภาพที่ 4.80 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนจากแบบจำลองปั่นป่วน $k-\varepsilon$

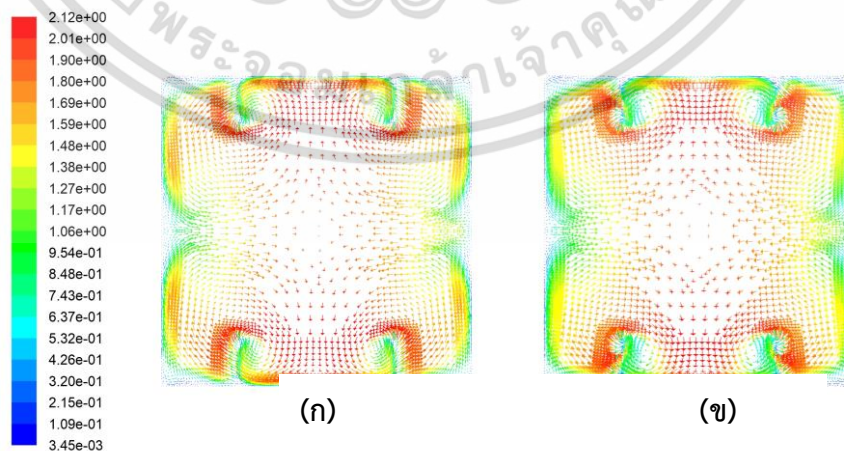
จากการวิเคราะห์เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล ดังภาพที่ 4.83 แสดงให้เห็นว่าความรุนแรงของการหมุนวนหลักลดลงเล็กน้อย อันเนื่องมาจากการไหลของของไหลผ่านช่องเจาะสี่เหลี่ยมทำให้เกิดการรบกวนการหมุนวนหลัก ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณผนังข้างซ้าย-ขวา ลดลงเล็กน้อย ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนที่ผนังบน-ล่าง มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน พิจารณาได้จากคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ ดังภาพที่ 4.82 แต่เนื่องจากการเจาะช่องสี่เหลี่ยมนี้เป็นการช่วยลดพื้นผิวปะทะ ทำให้การสูญเสียความดันมีค่าลดลง ดังนั้นตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.81 เส้นความเร็วของกระแสการไหลบนระนาบขวางทิศทางการไหล (ก) ไม่มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม และ (ข) มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 4.82 คอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์ต์ (ก) ไม่มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม และ (ข) มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 4.83 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบขวางทิศทางการไหล (ก) ไม่มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม และ (ข) มีการเจาะช่องสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ภายใต้สภาวะพลาจความร้อนที่ผิวคงที่ ในช่วงของค่าเลขเรย์โนลด์ส์ระหว่าง 4,000 ถึง 26,000 จากการศึกษาพบว่า การติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีในทุกกรณีให้ค่าตัวประกอบเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่ากรณีท่อเปล่า รวมทั้งให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีตลอดช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่ทดสอบ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1.185-1.386

2. กรณีที่มีตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดภายใต้เงื่อนไขการศึกษานี้มีค่าเท่ากับ 1.765 ที่เลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 4174.7 เมื่อติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดหัวแบบขีดพื้นผิวของท่อทดสอบ โดยปลายวีชี้สวนทางกับกระแสการไหล (V-upstream) อัตราส่วนพิตช์เท่ากับ 1, อัตราส่วนบล็อกเท่ากับ 0.15 และมุมปะทะเท่ากับ 30°

3. จากการศึกษาและวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่าเมื่อมีการติดตั้งแผ่นปีกรูปตัววีในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส จะทำให้ของไหลเกิดการหมุนวน 4 แกนการหมุนหลัก ซึ่งช่วยให้ของไหลตกกระทบและลดชั้นขีดผิวที่ผนังท่อ ทำให้เกิดการผสมกันของอุณหภูมิของไหลและมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น

4. ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการตรวจสอบความถูกต้องกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดลอง และได้นำเสนอโครงสร้างการไหลและรูปแบบการถ่ายเทความร้อนจากการศึกษาเชิงตัวเลขในรูปแบบเวกเตอร์ความเร็วของของไหล และคอนทัวร์ของเลขนัสเซลล์

5. จากการพัฒนาและปรับปรุงแผ่นปีกรูปตัววี โดยจะพิจารณาด้วยผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่าเมื่อนำกรณีที่ให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดที่ได้จากการทดลองมาเจาะช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าบริเวณพื้นผิวของแผ่นปีกรูปตัววีด้วยขนาดช่องเจาะ W/L เท่ากับ 0.4 และ V/H เท่ากับ 0.45 ให้ตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงขึ้นเป็น 2.0754

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้สามารถนำงานวิจัยนี้ไปใช้งานได้จริง และเนื่องจากข้อมูลของผลการศึกษาที่มีหลายชุดข้อมูล ดังนั้นควรพิจารณาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการสร้างสหสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทาน เลขนัสเซลล์ และตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน ของผลที่ได้จากการศึกษา และเนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนเป็นงานวิจัยที่ศึกษามุมปะทะ อัตราส่วนพิตช์ อัตราส่วนบล็อก และวิธีการติดตั้งของแผ่นปีกรูปตัววี จึงควรมีการศึกษาตัวแปรอื่นที่มีอิทธิพลต่อการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อใช้เป็นข้อมูลการออกแบบให้มีตัวประกอบการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนที่สูงขึ้น เช่น

1. ศึกษาการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนในรูปแบบอื่น
2. ศึกษาวิธีการติดตั้งในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสในรูปแบบต่าง ๆ
3. ศึกษาถึงมุมปะทะอื่น
4. ศึกษาถึงระยะพิตช์อื่น
5. ศึกษาถึงอัตราส่วนบล็อกอื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] กิตติชัย ดวงตาคำ (2555). การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่สอดแผ่นเจาะรูติดครีบริบตัววี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] จิตกร กนกนัยการ (2553). การศึกษาเชิงทดลองของการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนแบบช่องแผ่นขนานที่มีการติดตั้งครีบริบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมผืนผ้ารูปตัววี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ และสมพล สกุลหลง (2561). การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วนผ่านแผ่นปีกสามเหลี่ยม. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 28(3), 557-566.
- [4] วิชิตา เจษฎารัตนชัย (2559). การศึกษาเชิงตัวเลขของคุณลักษณะการไหลราบเรียบและการถ่ายเทความร้อนในท่อจัตุรัสที่มีแผ่นกั้นตัววี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] สมบัติ ทำนา (2552). การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนแบบลามินาร์ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้แผ่นกั้นวางเอียง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] สมพล สกุลหลง (2551). การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องแผ่นขนานโดยใช้ครีบริบตัววี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] สมพล สกุลหลงและคณะ (2554). พฤติกรรมความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้ครีบริบเอียงทำมุม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 ประจำปี 2554, เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย.
- [8] สุรียา โชคเพิ่มพูลและคณะ (2557). การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยตัวสร้างความปั่นป่วนแบบปีกรูปตัววี. วารสารวิจัย มข. มหาวิทยาลัยขอนแก่น ,19(2), 333-343.
- [9] Choi et al. (2002). Heat/mass transfer and pressure drop in a square duct with V-shaped ribs. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, 26(11), 1542-1551.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Gao and Sunden. (2001). Heat transfer and pressure drop measurements in rib-roughened rectangular ducts. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 24(1), 25-34.
- [11] H.E. Fawaz et al. (2018). Numerical investigation of fully developed periodic turbulent flow in a square channel fitted with 45° in-line V-baffle turbulators pointing upstream. **Alexandria Engineering Journal**, 57(2) , 633-642.
- [12] Promvong and Skullong. (2020). Thermo-hydraulic performance in heat exchanger tube with V-shaped winglet vortex generator. **Applied thermal Engineering**, 49(11), 2949-2955
- [13] Promvong and Thianpong (2008). Thermal performance of turbulent channel flows over different shaped ribs. **Int. Commun. Heat Mass Transfer**, 35(10) ,1327-1334.
- [14] Sripattanapipat et al. (2016). Numerical heat transfer study of turbulent tube flow through winglet-pairs. **Energy Procedia**, 100, 518-521.
- [15] Suriya and Sanhawat. (2015). Heat transfer and Fluid Flow Behavior of Air in Square Duct Heat transfer Inserted with V-downstream Winglet Turbulators. **KKU Research Journal**, 20(4), 393-404.
- [16] Zhang et al. (1991). Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs. **ASME J. Heat Transfer**, 113(3) ,590-596.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

TABLE A-15

Properties of air at 1 atm pressure

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat $c_p, \text{J/kg}\cdot\text{K}$	Thermal Conductivity $k, \text{W/m}\cdot\text{K}$	Thermal Diffusivity $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s}$	Kinematic Viscosity $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Note: For ideal gases, the properties c_p , k , μ , and Pr are independent of pressure. The properties ρ , ν , and α at a pressure P (in atm) other than 1 atm are determined by multiplying the values of ρ at the given temperature by P and by dividing ν and α by P .

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306057020-8.

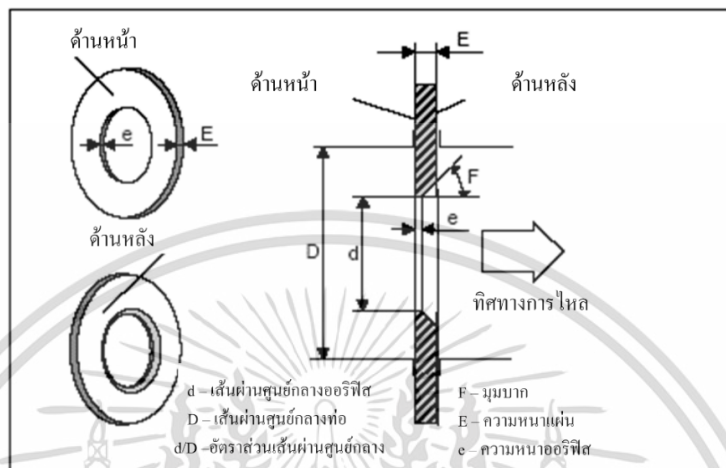
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.
อริฟิส

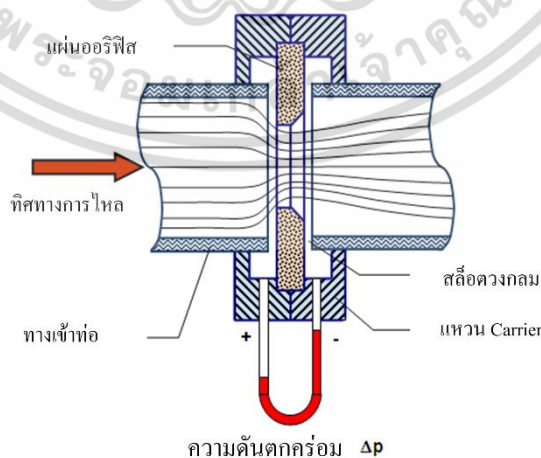
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออริฟิสนิตต่าง ๆ คล้ายคลึงกัน สามารถอธิบายด้วยกันได้ แต่ละชนิดแตกต่างกันที่ pressure tapping ซึ่ง orifice มาตรฐานกำหนดดังนี้ รูปร่างลักษณะ (description) ออริฟิส (orifice) ได้ แสดงหน้าตัดต่าง ๆ ดังภาพที่ ข-1



ภาพที่ ข-1 Standard orifice plate

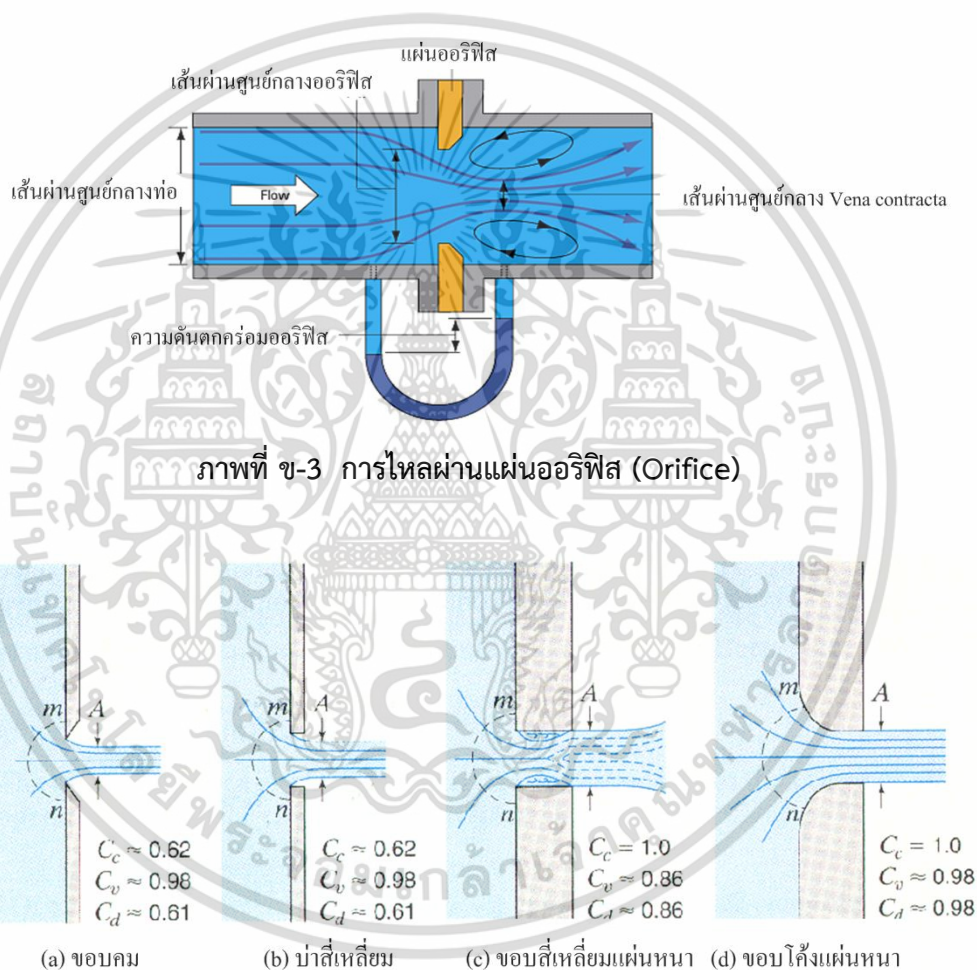
แผ่นออริฟิสเป็นแผ่นบางๆ ที่ถูกจับยึดระหว่างขอบของท่อ เนื่องจากมีรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่าย ๆ ดังนั้นจึงมีราคาถูก และง่ายในการติดตั้ง หรือการย้ายตำแหน่ง แต่อย่างไรก็ตามขอบของแผ่นอาจจะมีการสึกกร่อนได้ อันเนื่องจากการชนของอนุภาคเล็ก ๆ ที่กระจายอยู่ในของไหล ข้อเสียอีกประการ คือ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการขยายของด้านล่างของกระแส ทำให้มี head loss ถาวรที่สูงมาก จุดวัดความดันสำหรับออริฟิสนั้น สามารถกำหนดตำแหน่งได้หลายตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ ข-2 เนื่องจากตำแหน่งของจุดวัดความดันมีอิทธิพลต่อการหาสัมประสิทธิ์การไหล



ภาพที่ ข-2 โครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวัดอัตราการไหลของของไหลภายในท่อ และจัดได้ว่าออร์ฟิสเป็นเครื่องมือวัดที่เกิด ขวางการไหลของพื้นที่หน้าตัด ให้ของไหลไหลผ่านออร์ฟิสมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังแสดงในภาพที่ ข-3 ดังนั้นเมื่อนำออร์ฟิสไปติดตั้งกับท่อ ซึ่งมีของไหลไหลผ่านจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมออร์ฟิส ซึ่งความดันตกคร่อมนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการไหล กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลมีค่าสูง ความดันตกคร่อมออร์ฟิสก็จะมีค่าสูง และถ้าอัตราการไหลมีค่าต่ำ ความดันตกคร่อมออร์ฟิสก็จะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปออร์ฟิสจะถูกนำไปใช้ในการหาอัตราการไหลที่สภาวะ Steady state เท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้วัดอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Dynamic Response)



ภาพที่ ข-4 ออร์ฟิสแบบต่าง ๆ

ในบรรดาเครื่องมือวัดอัตราการไหลทั้งหลาย ออร์ฟิสถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีผู้นำไปใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด ดังนั้นการทดลองชุดนี้จึงได้มีการนำเอาการวัดอัตราการไหลแบบออร์ฟิสมาใช้ ออร์ฟิสมาตรฐานที่มีขอบคม ดังแสดงในภาพที่ ข-4 (a) หรือเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังภาพที่ ข-4 (b) นั้นจะ สัมผัสลำน้ำที่ไหลผ่านในลักษณะที่เป็นการสัมผัสแบบเส้น ส่วนออร์ฟิสดังภาพที่ ข-4 (c) และ ข-4 (d) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(d) นั้นไม่ใช่เป็นออริฟิสมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะลำน้ำที่ไหลผ่านรูออริฟิสนั้น ถูกกระทบจากความหนาของแผ่นวัตถุ กับความหยาบของผิว และรัศมีของความโค้ง ดังนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบเพื่อความถูกต้อง

ข้อดีของออริฟิส คือ มีราคาต่ำกว่าเครื่องมือวัดชนิดอื่น ๆ ที่อาศัยหลักการวัดเดียวกัน และสะดวกในการสร้างเพราะมีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อน รวมทั้งมีข้อมูลของการทํารายเกี่ยวกับพฤติกรรมในการวัดของไหล ที่มีเงื่อนไขแตกต่างกันมากมาย ของไหลเมื่อไหลผ่าน square-edged orifice ซึ่งเป็นออริฟิสที่นำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ จะมีทิศทางการไหลเป็นไปดังรูป สมมุติว่าของไหลก่อนเข้าปะทะกับออริฟิส มีความเร็วคงที่ตลอดหน้าตัดของท่อ (หน้าตัดวงกลม) เท่ากับ V_1 เมตรต่อวินาที ของไหลที่บริเวณด้านหลังของออริฟิส จะมีลักษณะเป็นลำของไหล ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำของไหลลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ $D/2$ เมตร ณ บริเวณจุดวัดความดันที่ 2 ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดที่มีพื้นที่หน้าตัดของการไหลน้อยที่สุด (Vena Contracta) ของ Jet ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Jet จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ 2 ไปแล้ว จุดที่ 2 หรือเรียกว่าจุด Vena Contracta ถือได้ว่าเป็นจุดที่ของไหลที่มีความเร็วเฉลี่ยสูงสุด หรือมีความดันสถิตย์ต่ำสุด (จากสมการของ Bernulli)

สมมติฐานเบื้องต้นสำหรับการวัดอัตราการไหลด้วยออริฟิสในการทดลองนี้ คือ ของไหลที่อยู่ภายในท่อไม่สามารถอัดตัวได้ ความเร็วของของไหลมีค่าคงที่ตลอดหน้าตัด (โดยไม่คิดบริเวณที่เรียกว่า บริเวณกระแสไหลวน) ของไหลไม่มีความหนืด และการไหลเกิดขึ้นแบบ Steady flow (อัตราการไหลมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลา)

สมการ Bernoulli สามารถนำมาใช้อธิบายคุณสมบัติในการไหลที่จุดใด ๆ ภายในท่อได้ โดยสมการ Bernoulli สำหรับจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของการไหล แสดงในภาพที่ ข-3 สามารถคำนวณหาค่าอัตราการไหลเมื่อติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบออริฟิส แสดงในสมการ (ข.1)

$$Q_{ac} = C_d A_o \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho g \left[1 - \left(\frac{d_o}{D} \right)^4 \right]}} \quad (\text{ข.1})$$

- เมื่อ C_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์การจ่าย (Discharge coefficient)
 A_o คือ พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส (m^2)
 P คือ ความดันสถิตย์ของของไหล (N/m^2)
 ρ คือ น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight, N/m^3)
 d_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรูออริฟิส
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้