

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อที่ใส่แหวนรูปตัววี

NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION IN A DUCT WITH
V-SHAPED RINGS



ยี่งยง แก้วก่อเกียรติ

YINGYONG KAEWKOHKIAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-D-058-015

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อที่ใส่แหวนรูปตัววี

NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION IN A DUCT WITH
V-SHAPED RINGS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-D-058-015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL HEAT TRANSFER INVESTIGATION IN A DUCT WITH
V-SHAPED RINGS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-EN-D-058-015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงตัวเลขในท่อที่ใส่แหวนรูปตัววี
นักศึกษา	นายยิ่งยง แก้วก่อเกียรติ
รหัสนักศึกษา	53610208
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนใน 3 มิติ ที่ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์และซ้ำเป็นช่วง แบบจำลองนี้พัฒนาขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการไหลแบบไม่อัดตัวและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมผ่านแหวน 3 รูปแบบ ได้แก่ แหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี ท่อถูกให้พลั๊กซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังและใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ อัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงตามค่าเลขเรย์โนลด์ในช่วง $Re=3000-20,000$ ชุดของแหวนถูกจัดวางแบบซี่ทวนกระแสการไหล แหวนแต่ละอันทำมุมปะทะ 30° และ 45° อัตราส่วนระยะพิทช์เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 อัตราส่วนความสูงแหวนเท่ากับ 0.05, 0.075, 0.10, 0.15 และ 0.20 โดยจะทำการศึกษาเชิงตัวเลขของพารามิเตอร์เหล่านี้ต่อการสูญเสียความดันตกคร่อม การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน การคำนวณเชิงตัวเลขใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ ใช้ระเบียบวิธีการคำนวณแบบ QUICK ส่วนการคำนวณสนามความดันใช้ระเบียบวิธี SIMPLE

ผลการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่า กรณีแหวนรูปตัววี ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 2.97 ที่ $PR=0.5$, $BR=0.075$, $\alpha=30^\circ$ และ $Re=3000$ กรณีแหวนวงรีรูปตัววีเท่ากับ 3.06 ที่ $PR=0.5$, $BR=0.10$, $\alpha=30^\circ$ และ $Re=3000$ และกรณีแหวนแคปซูลรูปตัววีเท่ากับ 2.94 ที่ $PR=0.5$, $BR=0.15$, $\alpha=30^\circ$ และ $Re=3000$ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววีที่ $PR=0.5$, $\alpha=30^\circ$ และ $Re=3000$ สำหรับกรณี $BR=0.05$ ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 2.81, 2.77 และ 2.05 สำหรับแหวนวงรีรูปตัววี แหวนรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ ส่วนที่กรณี $BR=0.20$ ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 2.88, 2.74 และ 2.23 ที่ $Re=3000$ สำหรับแหวนแคปซูลรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนรูปตัววี ตามลำดับ การหาขนาดของแหวนที่เหมาะสมได้ทำการทดสอบกับแหวนวงรีรูปตัววี เนื่องจากค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดมีค่ามากกว่าแหวนรูปแบบอื่น โดยขนาดและการจัดวางแหวนวงรีรูปตัววีที่เหมาะสมที่ให้ค่า TEF สูงสุดมีค่าเท่ากับ 3.65 อยู่ที่ $PR=0.275$, $BR=0.075$, $\alpha=30^\circ$ และ $Re=3000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Numerical Heat Transfer Investigation in a Duct with V-Shaped Rings
Student	Mr. Yingyong Kaewkohkiat
Student ID.	53610208
Degree	Doctor of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge

ABSTRACT

In this thesis, computational models of periodic three-dimensional steady-state incompressible turbulent flow and heat transfer have been developed to investigate the fluid flow structure and heat transfer characteristics of proposed configurations in a circular duct. The main configurations comprise of three different shape of rings: V-shaped rings or V-rings, V-shaped oval rings, and V-shaped capsule rings fitted in a constant heat-flux duct. The working fluid is air with varied flow rates in terms of Reynolds number ranging from 3000-20,000. The numerical simulation is based on the finite volume method and the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. The QUICK scheme is treated to solve the governing equations. The SIMPLE algorithm is used for handling the pressure-velocity coupling.

The computation results reveal that Reynolds number 3000 provides the highest thermal enhancement factor for each studied configuration. The V-shaped capsule ring gives highest thermal enhancement factor of 2.94 at pitch ratio 0.5, blockage ratio 0.15, and attack angle 30°. The V-shaped ring gives highest thermal enhancement factor of 2.97 at pitch ratio 0.5, blockage ratio 0.075, and attack angle 30°. The V-shaped oval ring gives highest thermal enhancement factor of 3.06 at pitch ratio 0.5, blockage ratio 0.10, and attack angle 30°.

Comparing the results among each configuration at the same pitch ratio 0.5, attack angle 30°, and Reynolds number 3000, for smallest blockage ratio 0.05, the V-shaped oval ring, V-shaped ring, and V-shaped capsule ring provide thermal enhancement factor of 2.81, 2.77, and 2.05, respectively. However, at highest

blockage ratio 0.20, the V-shaped capsule ring, V-shaped oval ring, and V-shaped ring provide thermal enhancement factor of 2.88, 2.74, and 2.23, respectively.

In addition, since the highest thermal enhancement factor is found at V-shaped oval ring, the optimal size of ring and arrangement have further examined based on computation results. The highest thermal enhancement factor of 3.65 is found at pitch ratio 0.275, blockage ratio 0.075, attack angle 30° , and Reynolds number 3000.



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์นี้จนประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร.สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์ ผศ. ดร.ณัตวิภา เจียรระโนวชิระ ผศ. ดร.วิฑาตา เจษฎารัตนชัย และ ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์ สำหรับ คำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์นี้

ขอแสดงความขอบคุณ ดร.วัชรินทร์ หนูทอง ดร.สมบัติ ทำนา ผศ. ดร.สมพล สกุลหลง ดร.สุริยา โชคเพิ่มพูน ผศ. ดร.ปาริฉัตร คงทอง และสมาชิกห้องปฏิบัติการ Thermo-Fluid and CFD ทุกคน สำหรับคำแนะนำและการช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอแสดงความขอบคุณอย่างมากต่อภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้โอกาสทางการศึกษาแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน สำหรับ ทุนสนับสนุนสำหรับการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนตลอดเวลาหลายปีที่ผ่านมา

ยิ่งยง แก้วก่อเกียรติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ IV การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูป	XII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XIX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.3.1 การทดสอบการไหลในท่อสี่เหลี่ยม	2
1.3.2 การทดสอบการไหลในท่อกลม	3
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย	3
1.5 สมมุติฐาน	4
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	6
2.1 การศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนจากการวัดอุณหภูมิด้วยแผ่น TLC	6
2.2 การประยุกต์ใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส	7
2.3 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนาน	8
2.4 การศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม	12
2.4.1 ไบบิต	12
2.4.2 อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนอื่น ๆ	13
บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	16
3.1 สมมุติฐานของการไหลและสมการควบคุม	16
3.1.1 สมมุติฐานของการไหลและการถ่ายเทความร้อน	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 สมการความต่อเนื่อง	17
3.1.3 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม	17
3.1.4 สมการอนุรักษ์พลังงาน	18
3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน	18
3.2.1 สมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวีย-สโตกส์	19
3.2.2 กฎของผนัง	20
3.2.3 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$	22
3.2.4 แบบจำลองใกล้ผนังสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต	23
3.3 ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม	25
3.3.1 ระเบียบวิธี QUICK	28
3.4 ระเบียบวิธีการแก้ปัญหา	30
3.4.1 วิธีการคำนวณแบบ pressure-based approach	30
3.4.2 ความสัมพันธ์ของความดันและความเร็วกับระเบียบวิธีแบบ SIMPLE	31
3.4.3 ระเบียบวิธีการประมาณค่าความดัน	37
3.4.4 วิธีการประมาณค่าเกรเดียนต์	38
3.5 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น	40
3.5.1 เงื่อนไขขอบที่ผนัง	40
3.5.2 เงื่อนไขขอบเขตสมมาตร	40
3.5.3 เงื่อนไขขอบเขตแบบคาบ	41
3.6 ขั้นตอนการแก้ปัญหา	42
3.7 ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการประเมินสมรรถนะเชิงความร้อน	43
3.8 โครงสร้างการไหล	45
บทที่ 4 การทดสอบการไหลในท่อสี่เหลี่ยม	46
4.1 การศึกษาเชิงทดลองของแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้งในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า	46
4.1.1 ชุดท่อทดสอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้ง	46
4.1.2 ขั้นตอนการทดลอง	49
4.1.3 หลักการทำงานของสาร TLC	50
4.1.4 การสอบเทียบสีกับอุณหภูมิแผ่น TLC	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ M ศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.5 การแปลงสีเป็นอุณหภูมิ	51
4.1.6 การหาค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการวิเคราะห์ภาพ	52
4.1.7 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับแผ่นกั้นรูปตัววี ในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า	53
4.1.8 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับแผ่นกั้นรูปโค้ง ในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า	55
4.2 การทดสอบเชิงตัวเลขสำหรับการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัวในท่อจตุรัส	57
4.2.1 รูปร่างของแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัวและการจัดวางสำหรับการจำลองเชิงตัวเลข	58
4.2.2 ขอบเขตการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อน	58
4.2.3 การสร้างกริด	62
4.2.4 เงื่อนไขที่ขอบและเงื่อนไขเริ่มต้น	62
4.2.5 ระเบียบวิธีการคำนวณและเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบ	63
4.2.6 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับแผ่นกั้นรูปตัววีในท่อจตุรัส	64
บทที่ 5 ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขสำหรับการไหลผ่านแหวนรูปตัววี	71
5.1 รายละเอียดการคำนวณ	71
5.1.1 รูปร่างของแหวนรูปตัววีและการจัดวางสำหรับการจำลองเชิงตัวเลข	71
5.1.2 ขอบเขตการคำนวณ	71
5.1.3 การสร้างกริด	73
5.1.4 เงื่อนไขที่ขอบและเงื่อนไขเริ่มต้น	74
5.1.5 ระเบียบวิธีการคำนวณและเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบ	75
5.2 ขั้นตอนการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน	76
5.2.1 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เพียงพอสำหรับการทดสอบ	76
5.2.2 การตรวจสอบแบบจำลองความปั่นป่วนกับสหสัมพันธ์สำหรับการไหล ในท่อกลมผิวเรียบ	77
5.3 ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองการไหล ผ่านแหวนรูปตัววี	80
5.3.1 ข้อมูลจากการทดลอง	80
5.3.2 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ VII รัชศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 ความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน.....	84
6.1 ขอบเขตการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อน	84
6.2 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน	86
6.2.1 ผลการตรวจสอบจำนวนกริดที่เพียงพอสำหรับการทดสอบแหวนรูปตัววี.....	86
6.2.2 ผลการตรวจสอบแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลในท่อกลมผิวเรียบ	88
6.3 ผลการทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองการไหลผ่านแหวนรูปตัววี	90
6.3.1 ผลการทดสอบค่าตัวประกอบเสียดทานและการถ่ายเทความร้อน ของแหวนรูปตัววี.....	90
บทที่ 7 การทดสอบเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวนรูปตัววี.....	92
7.1 ขอบเขตการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อน	92
7.2 ลักษณะการไหลของอากาศสำหรับกรณีแหวนรูปตัววี	94
7.2.1 อิทธิพลจากเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนระยะพิทช์.....	94
7.2.2 อิทธิพลจากอัตราส่วนความสูงแหวน	98
7.2.3 อิทธิพลจากมุมปะทะ.....	105
7.3 การถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณีแหวนรูปตัววี.....	105
7.3.1 อิทธิพลจากเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนระยะพิทช์.....	106
7.3.2 อิทธิพลจากอัตราส่วนความสูงแหวน	111
7.3.3 อิทธิพลจากมุมปะทะ.....	118
7.4 ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสำหรับกรณีแหวนรูปตัววี.....	120
7.4.1 อิทธิพลจากเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนระยะพิทช์.....	120
7.4.2 อิทธิพลจากอัตราส่วนความสูงแหวน	123
บทที่ 8 การทดสอบเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี.....	126
8.1 รายละเอียดการคำนวณ	126
8.2 ขอบเขตการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อน	126
8.2.1 การสร้างกริด.....	131
8.3 ลักษณะการไหลของอากาศสำหรับกรณีแหวนวงรีรูปตัววี.....	132
8.3.1 อิทธิพลจากเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนระยะพิทช์.....	132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ MII:ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
8.3.2 อิทธิพลจากอัตราส่วนความสูงแหวน	136
8.3.3 อิทธิพลจากมุมปะทะ.....	139
8.4 การถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณีแหวนวงรีรูปตัววี	140
8.4.1 อิทธิพลจากเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนระยะพิทช์.....	140
8.4.2 อิทธิพลจากอัตราส่วนความสูงแหวน	146
8.4.3 อิทธิพลจากมุมปะทะ.....	151
8.5 ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสำหรับกรณีแหวนวงรีรูปตัววี	153
8.5.1 อิทธิพลจากเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนระยะพิทช์.....	153
8.5.2 อิทธิพลจากอัตราส่วนความสูงแหวน	156
8.6 ลักษณะการไหลของอากาศสำหรับกรณีแหวนแคปซูลรูปตัววี	158
8.6.1 อิทธิพลจากเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนระยะพิทช์.....	158
8.6.2 อิทธิพลจากอัตราส่วนความสูงแหวน	162
8.7 การถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณีแหวนแคปซูลรูปตัววี.....	166
8.7.1 อิทธิพลจากเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนระยะพิทช์.....	166
8.7.2 อิทธิพลจากอัตราส่วนความสูงแหวน	172
8.8 ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสำหรับกรณีแหวนแคปซูลรูปตัววี	177
8.8.1 อิทธิพลจากเลขเรย์โนลด์และอัตราส่วนระยะพิทช์.....	177
8.8.2 อิทธิพลจากอัตราส่วนความสูงแหวน	180
บทที่ 9 ขนาดของแหวนที่เหมาะสมและสหสัมพันธ์	183
9.1 ผลการทดสอบเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี.....	183
9.2 ขนาดและการจัดวางที่เหมาะสมของแหวนวงรีรูปตัววี.....	187
9.3 สหสัมพันธ์ของการไหล	189
บทที่ 10 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	195
10.1 สรุปผลการวิจัย.....	195

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
10.1.1 การศึกษาเชิงทดลองของการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	195
10.1.2 การศึกษาเชิงทดลองของการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปโค้งในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	195
10.1.3 การศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัว ในท่อจัตุรัส.....	195
10.1.4 การทดสอบแบบจำลองเชิงตัวเลขของการไหลผ่านท่อกลมผิวเรียบ และผลการทดลอง.....	196
10.1.5 การศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวนในท่อกลม.....	196
10.2 ข้อเสนอแนะ.....	198
เอกสารอ้างอิง.....	199
ภาคผนวก.....	208
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	209
ประวัติผู้เขียน.....	215

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	8
2.2 การศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนในช่องขนาน.....	12
2.3 การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อกลมด้วยใบปิด.....	13
2.4 การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อกลมด้วยอุปกรณ์อื่น.....	14
3.1 สัมประสิทธิ์ที่กึ่งกลางและสัมประสิทธิ์ข้างเคียงตามระเบียบวิธี QUICK.....	29
3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการค่าแก้ความดัน.....	36
4.1 ตัวแปรของรูปร่างและสภาวะการไหลที่ใช้ทดสอบแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้ง.....	49
4.2 สัมประสิทธิ์ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสี Hue.....	52
4.3 พารามิเตอร์ของรูปร่างปัญหาและสภาวะการไหลที่ใช้ทดสอบแผ่นกั้นรูปตัววี.....	60
4.4 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข.....	61
4.5 อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองเชิงตัวเลขสำหรับทดสอบแผ่นกั้นรูปตัววี.....	61
4.6 ระเบียบวิธีที่ใช้ในการคำนวณวิธีเชิงตัวเลข.....	63
4.7 เศษตกค้างของตัวแปรและเกณฑ์ของการรู้เข้าสู่คำตอบ.....	64
5.1 ระเบียบวิธีที่ใช้ในการคำนวณวิธีเชิงตัวเลข.....	75
5.2 เศษตกค้างของตัวแปรและเกณฑ์ของการรู้เข้าสู่คำตอบ.....	76
5.3 สหสัมพันธ์ค่าตัวประกอบเสียดทานที่ใช้ทดสอบการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมผิวเรียบ.....	78
5.4 สหสัมพันธ์ค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยที่ใช้ทดสอบการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมผิวเรียบ.....	80
5.5 การวัดความไม่แน่นอนจากการติดตั้งการทดลอง.....	82
6.1 พารามิเตอร์ของรูปร่างและสภาวะการไหลที่ใช้ตรวจสอบและทดสอบแหวนรูปตัววี.....	85
6.2 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข.....	85
6.3 อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลในท่อกลมผิวเรียบ.....	86
6.4 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เพียงพอของแบบจำลองแหวนรูปตัววี ที่ $Re=19,673$	86
7.1 พารามิเตอร์ของรูปร่างปัญหาและสภาวะการไหลที่ใช้ทดสอบแหวนรูปตัววี.....	93
7.2 อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองเชิงตัวเลขสำหรับทดสอบแหวนรูปตัววี.....	93
8.1 พารามิเตอร์และสภาวะการไหลที่ใช้ทดสอบแหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี.....	127
8.2 อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองเชิงตัวเลข.....	127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อXlrศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนใน 1 มิติที่สภาวะคงตัว	19
3.2 โพรไฟล์ความเร็วสำหรับชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วน	21
3.3 วิธีการจำลองใกล้ผนัง	24
3.4 ปริมาตรควบคุมรอบจุดต่อ P	27
3.5 เส้นประมาณของฟังก์ชันกำลังสอง.....	28
3.6 ผังงานสำหรับระเบียบวิธี Pressure-based segregated.....	31
3.7 ปริมาตรควบคุมสำหรับความเร็ว u	32
3.8 ปริมาตรควบคุมสำหรับความเร็ว v	33
3.9 ปริมาตรควบคุมของปริมาณสเกลาร์ที่ใช้สำหรับแปลงสมการความต่อเนื่อง	34
3.10 ผังงานสำหรับการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็วด้วยขั้นตอนวิธี Pressure based segregated กับระเบียบวิธีแบบ SIMPLE	37
3.11 ปริมาตรควบคุมที่ใช้แสดงการแปลงสมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลาร์.....	38
3.12 การประเมินเกรเดียนต์จากจุดเซนทรอยด์ของเซลล์	39
3.13 การใช้ระนาบสมมาตรเพื่อลดขนาดของแบบจำลองเหลือ 1 ใน 4 ส่วน.....	40
3.14 ตัวอย่างลักษณะรูปร่างเรขาคณิตของขอบเขตแบบคาบ	41
4.1 ช่องทางการไหลและการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีในส่วนทดสอบ.....	47
4.2 ช่องทางการไหลและการติดตั้งแผ่นกั้นรูปโค้งในส่วนทดสอบ	48
4.3 แผนผังชุดทดสอบการไหลในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	48
4.4 สีของแผ่น TLC จากการสอบเทียบ.....	50
4.5 เส้นแนวโน้มของการสอบเทียบระหว่างอุณหภูมิกับค่าเฉดสี Hue	51
4.6 สีของอุณหภูมิบนแผ่น TLC ของท่อผิวเรียบ	53
4.7 สีของอุณหภูมิและค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉพาะจุด (Nu_x) บนแผ่น TLC ที่ $PR=4.0$	53
4.8 สีของอุณหภูมิและค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉพาะจุด (Nu_x) บนแผ่น TLC ที่ $PR=8.0$	54
4.9 การเปลี่ยนแปลง f กับ Re	55
4.10 สีของอุณหภูมิบนผิว TLC ที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปโค้ง	55
4.11 ค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉพาะจุด (Nu_x) บนแผ่น TLC ที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปโค้ง.....	56
4.12 การเปลี่ยนแปลง Nu กับ Re	57
4.13 รูปร่างของแผ่นกั้นรูปตัววีและการจัดวางสำหรับการคำนวณ	58
4.14 ขอบเขตการคำนวณสำหรับแผ่นกั้นรูปตัววี.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ XII การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	62
4.16	64
4.17	65
4.18	66
4.19	67
4.20	67
4.21	68
4.22	68
4.23	69
4.24	70
5.1	72
5.2	73
5.3	74
5.4	74
5.5	81
5.6	82
6.1	87
6.2	87
6.3	88
6.4	89
6.5	89
6.6	90
6.7	91
7.1	94
7.2	95
7.3	95
7.4	96
7.5	96
7.6	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ XIII ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.7 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	98
7.8 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	98
7.9 กระแสการไหลบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ Re=7500.....	99
7.10 การกระจายความดันบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ Re=7500.....	100
7.11 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ PR=0.5.....	102
7.12 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ PR=1.0.....	102
7.13 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ PR=1.5.....	103
7.14 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ PR=2.0.....	103
7.15 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	104
7.16 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	104
7.17 การกระจายความดันบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง α ที่ Re=7500.....	105
7.18 ค่า Nu_x เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ PR=0.5, BR=0.05 และ $\alpha=30^\circ$	106
7.19 ค่า Nu_x เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $\alpha=30^\circ$, BR=0.05 และ Re=7500.....	107
7.20 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ BR=0.05.....	108
7.21 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ BR=0.075.....	109
7.22 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ BR=0.10.....	109
7.23 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ BR=0.15.....	110
7.24 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ BR=0.20.....	110
7.25 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	111
7.26 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	111
7.27 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ Re=7500.....	112
7.28 ค่า Nu_x เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $\alpha=30^\circ$, PR=0.5 และ Re=7500.....	114
7.29 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ PR=0.5.....	115
7.30 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ PR=1.0.....	116
7.31 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ PR=1.5.....	116
7.32 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ PR=2.0.....	117
7.33 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	117
7.34 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	118
7.35 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง α ที่ Re=7500.....	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่XIVรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.36 ค่า Nu_x เมื่อเปลี่ยนแปลง α ที่ $Re=7500$	119
7.37 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.05$	120
7.38 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.075$	121
7.39 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.10$	121
7.40 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.15$	122
7.41 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.20$	122
7.42 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	123
7.43 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	123
7.44 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	124
7.45 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	124
8.1 รูปร่างแหวนวงรีรูปตัววีและการจัดวางสำหรับการคำนวณ	128
8.2 รูปร่างแหวนแคปซูลรูปตัววีและการจัดวางสำหรับการคำนวณ	129
8.3 ขอบเขตการคำนวณสำหรับแหวนวงรีรูปตัววี.....	130
8.4 ขอบเขตการคำนวณสำหรับแหวนแคปซูลรูปตัววี.....	130
8.5 โครงสร้างกริดที่ใช้สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับแหวนวงรีรูปตัววี	131
8.6 โครงสร้างกริดที่ใช้สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับแหวนแคปซูลรูปตัววี.....	131
8.7 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.05$	132
8.8 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.075$	133
8.9 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.10$	133
8.10 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.15$	134
8.11 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.20$	134
8.12 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	135
8.13 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	135
8.14 กระแสการไหลบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $Re=7500$	136
8.15 การกระจายความดันบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $Re=7500$	137
8.16 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $PR=0.5$	138
8.17 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	139
8.18 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	139
8.19 การกระจายความดันบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง α ที่ $Re=7500$	140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ XVI ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.20 ค่า Nu_x เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $PR=0.5$, $BR=0.05$ และ $\alpha=30^\circ$	141
8.21 ค่า Nu_x เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $\alpha=30^\circ$, $BR=0.05$ และ $Re=7500$	142
8.22 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.05$	143
8.23 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.075$	143
8.24 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.10$	144
8.25 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.15$	144
8.26 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.20$	145
8.27 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	145
8.28 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	146
8.29 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $Re=7500$	147
8.30 ค่า Nu_x เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $\alpha=30^\circ$, $PR=0.5$ และ $Re=7500$	148
8.31 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $PR=0.5$	150
8.32 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	150
8.33 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	151
8.34 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง α ที่ $Re=7500$	151
8.35 ค่า Nu_x เมื่อเปลี่ยนแปลง α ที่ $Re=7500$	152
8.36 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.05$	153
8.37 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.075$	154
8.38 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.10$	154
8.39 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.15$	155
8.40 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.20$	155
8.41 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	156
8.42 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	156
8.43 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	157
8.44 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	157
8.45 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.05$	159
8.46 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.075$	159
8.47 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.10$	160
8.48 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.15$	160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่XVIหรือศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.49 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.20$	161
8.50 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	161
8.51 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	162
8.52 กระแสการไหลบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $Re=7500$	162
8.53 การกระจายความดันบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $Re=7500$	163
8.54 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $PR=0.5$	165
8.55 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	165
8.56 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	166
8.57 ค่า Nu_x เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $PR=0.5$, $BR=0.05$ และ $\alpha=30^\circ$	166
8.58 ค่า Nu_x เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $\alpha=30^\circ$, $BR=0.05$ และ $Re=7500$	167
8.59 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.05$	169
8.60 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.075$	169
8.61 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.10$	170
8.62 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.15$	170
8.63 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.20$	171
8.64 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	171
8.65 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	172
8.66 การกระจายอุณหภูมิบนระนาบตัดขวาง เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $Re=7500$	172
8.67 ค่า Nu_x เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $\alpha=30^\circ$, $PR=0.5$ และ $Re=7500$	174
8.68 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง BR ที่ $PR=0.5$	175
8.69 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	176
8.70 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	176
8.71 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.05$	177
8.72 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.075$	178
8.73 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.10$	178
8.74 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.15$	179
8.75 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $BR=0.20$	179
8.76 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	180
8.77 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ PR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่XVIIรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.78 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=30^\circ$	181
8.79 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $\alpha=45^\circ$	181
9.1 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง f/f_0 ระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ PR=0.5, BR=0.05 และ $\alpha=30^\circ$	183
9.2 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 ระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ PR=0.5, BR=0.05 และ $\alpha=30^\circ$	184
9.3 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง TEF ระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ PR=0.5, BR=0.05 และ $\alpha=30^\circ$	185
9.4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง f/f_0 ระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ PR=0.5, BR=0.20 และ $\alpha=30^\circ$	185
9.5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 ระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ PR=0.5, BR=0.20 และ $\alpha=30^\circ$	186
9.6 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง TEF ระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ PR=0.5, BR=0.20 และ $\alpha=30^\circ$	187
9.7 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $\alpha=30^\circ$ และ Re=3000	187
9.8 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $\alpha=30^\circ$ และ Re=3000	188
9.9 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $\alpha=30^\circ$ และ Re=3000	188
9.10 ค่า f ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนรูปตัววี	190
9.11 ค่า Nu ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนรูปตัววี	190
9.12 ค่า TEF ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนรูปตัววี	191
9.13 ค่า f ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนวงรีรูปตัววี	191
9.14 ค่า Nu ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนวงรีรูปตัววี	192
9.15 ค่า TEF ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนวงรีรูปตัววี	192
9.16 ค่า f ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนแคปซูลรูปตัววี	193
9.17 ค่า Nu ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนแคปซูลรูปตัววี	193
9.18 ค่า TEF ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนแคปซูลรูปตัววี	194

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ คำจำกัดความ (หน่วย SI)

a	ค่าสัมประสิทธิ์ของจุดต่อ
A	พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m^2)
AR	สัดส่วนความกว้างต่อความสูงของท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือช่องขนาน
B	ค่าคงที่จากการทดลองในกฎของผนัง
BR	อัตราส่วนความสูงแผ่นกั้นหรือแหวน
c	เซลล์
c	ระยะลอยตัว
CR	อัตราส่วนระยะลอยตัว
c_p	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ($J/(kg \cdot K)$)
c_v	ความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ ($J/(kg \cdot K)$)
D	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อกลมหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)
D_h	เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก (mm)
e	ความสูงแผ่นกั้นหรือแหวน (mm)
f	ค่าตัวประกอบเสียดทาน
F	ฟังก์ชันการรวมกัน (Blending function)
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/(m^2 \cdot K)$)
H	ความสูงของท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือช่องขนาน ความกว้างของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส (mm)
i	พลังงานภายใน (J/kg)
I	กระแสไฟฟ้า (A)
J	สัมประสิทธิ์ของเมทริกซ์
k	ค่าการนำความร้อน ($W/(m \cdot K)$)
k	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนต่อหน่วยมวล (J/kg)
K	พลังงานจลน์เฉลี่ย (Mean kinetic energy)
l	สเกลความยาว
L	ความยาวหรือความยาวคาบ (mm)
n	จำนวนสมาชิกตัวที่ n
N	จำนวนสมาชิกของเซต จำนวนตัวอย่าง
Nu	ค่าเลขนัสเซลล์ท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์ คำจำกัดความ (หน่วย SI)

P	ความดัน (Pa, N/m ²)
P	ระยะพิตช์ (mm)
P	กำลังไฟฟ้า (W)
P, E, W, N, S, WW, EE	จุดต่อในระเบียบวิธีปริมาตรควบคุมและ QUICK
Pr	เลขพรานด์
PR	อัตราส่วนระยะพิตช์
ΔP	ความดันตกคร่อม (Pa, N/m ²)
q	ฟลักซ์ความร้อน (W/m ²)
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
r	รัศมีภายในท่อกลม (mm) รัศมีแผ่นกั้นรูปโค้ง (mm)
\vec{r}	เวกเตอร์ตำแหน่ง
R	ความไม่แน่นอนในตัวแปรอิสระ
Re	ค่าเลขเรย์โนลด์
S	พจน์ของการก่อกำเนิด
S.D.	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
t	เวลา (s)
T	อุณหภูมิ (°C, K)
T	ช่วงเวลาเฉลี่ย
TEF	ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน
u, v, w	องค์ประกอบความเร็วในทิศทาง x, y และ z ในระบบพิกัดฉาก (m/s)
U	เวกเตอร์ของความเร็ว (m/s)
V	แรงดันไฟฟ้า (Volt)
W	ตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก
W	ความกว้างของท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือช่องขนาน (mm)
x	ระยะทางตามทิศทางการไหล
x, y, z	ระบบพิกัดฉาก (m)
X, Y	ตัวแปรอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ XX ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์กรีก

α	เลขพหุคูณที่ยังผลคูณ มุมปะทะหรือมุมเอียงของแผ่นกั้นที่ทำมุมกับแนวการไหล (degree)
Γ	สัมประสิทธิ์ของการแพร่
ε	อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเนื่องจากความหนืด (m^2/s^3)
κ	Von Kármán constant
μ	ค่าความหนืดพลวัต (Pa·s)
ν	ค่าความหนืดจลน์ (m^2/s)
ρ	ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
σ	เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ
τ	ความเค้นเฉือน (Pa, N/m^2)
φ	ค่าคุณสมบัติของการไหล (Flow property)
ϕ	ค่าคุณสมบัติใดๆ
Ω	เทนเซอร์ค่าเฉลี่ยของอัตราการหมุน (S^{-1})

ตัวห้อย

air	อากาศ
b, bulk	ของไหล
bs	blue start
conv	การพาความร้อน
CV	ปริมาตรควบคุม
eff	ค่ายังผล
e, w, n, s	ผิวหน้าของปริมาตรควบคุมระหว่างจุดต่อ P และ E, P และ W P และ N, P และ S
E, W, N, S, P	จุดต่อด้านตะวันออก ตะวันตก เหนือ ใต้ และกึ่งกลาง
EE, WW	จุดต่อทางด้านท้ายและต้นกระแสน้ำ
Exp	ค่าที่ได้จากการทดลอง
f, face	ผิวหน้าเซลล์
i, j, l, J	สัญลักษณ์บ่งชี้ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian indices)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวห้อย

inlet	ทางเข้า
lam	ราบเรียบ
m	ค่าเฉลี่ย
nb	จุดต่อข้างเคียง
outlet	ทางออก
pp	กำลังปัม
Pred	ค่าที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข
rs	red start
ref	อ้างอิง
s	พื้นผิว
St	ค่าที่ได้จากสหสัมพันธ์
t, turb	ปั่นป่วน
w	ผนัง
x, y, z	องค์ประกอบแกน x, y และ z
0	ทอกลมผิวเรียบ
0, 1	เซลล์ 0 เซลล์ 1

ตัวยก

+	Sublayer-scaled value
'	ค่าผันแปร (Fluctuating quantity)
*	ค่าปัจจุบันของตัวแปรที่อยู่ในกระบวนการการทำซ้ำ
-	ค่าเฉลี่ย
new	ค่าที่ถูกปรับปรุง

สัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์

d/dx	อนุพันธ์เทียบตัวแปร x (Derivative with respect to x, m^{-1})
$\partial/\partial t$	อนุพันธ์ย่อยเทียบกับเวลา (Partial time derivative operator, s^{-1})
$\nabla\phi$	เกรเดียนต์ของค่าคุณสมบัติ

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

คำย่อ

GCI	Grid convergence index
QUICK	Quadratic upstream interpolation for convective kinetics
RNG	Renormalization-group
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
LCT	Liquid Crystal Thermography technique
TLC	Thermochromic Liquid Crystals



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาการวิจัย

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมทั่วไป อุตสาหกรรมยานยนต์ หรือแม้กระทั่งการใช้งานด้านการบินและอวกาศ [1] ตัวอย่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ หอทำความเย็น เครื่องระเหย เครื่องควบแน่น หม้อน้ำ เครื่องทำความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น จากการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องและยาวนานด้วยวิธีการที่หลากหลาย โดยมีจุดประสงค์ให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงและมีขนาดเล็ก หนึ่งในวิธีเหล่านั้นคือการติดตั้งตัวสร้างกระแสหมุนวน (Vortex generators, VGs) เช่น ชุดของแผ่นกั้น ครีบ หรือแหวนในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มระดับของการถ่ายเทความร้อน แต่ผลที่ตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้และต้องให้ความสนใจอย่างมากหลังจากติดตั้งอุปกรณ์เหล่านี้คือการเพิ่มขึ้นของความดันตกคร่อมที่ทำให้สูญเสียพลังงานมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นการยากและมีความท้าทายอย่างยิ่งในการหาจุดร่วมของประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ดีเยี่ยมและมาพร้อมกับขนาดที่เล็กลง อีกทั้งการออกแบบท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีพารามิเตอร์จำนวนมากที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นรูปร่าง ขนาด หรือการจัดวางอุปกรณ์สร้างกระแสหมุนวนต่าง ๆ วิทยานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีความเกี่ยวข้องกับการติดตั้งตัวสร้างกระแสหมุนวนแบบแผ่นกั้นและแหวนภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสามส่วนหลัก ส่วนแรกเป็นการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยม ซึ่งประกอบไปด้วยการศึกษาเชิงทดลองสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววี (V-baffles) และแผ่นกั้นรูปโค้ง (Arc-shaped baffles) ที่ติดตั้งอย่างต่อเนื่องในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าและศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลข 3 มิติสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัว (Detached V-baffles) ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ส่วนที่สองเป็นการศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลข 3 มิติสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศผ่านแหวนรูปตัววี (V-shaped rings หรือ V-rings) ที่จัดวางอย่างต่อเนื่องในท่อกลม โดยศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อโครงสร้างการไหลและพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ เช่น รูปร่าง ขนาด การจัดวาง และประเมินตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน ส่วนที่สามเป็นการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่ไหลผ่านแหวนวงรีรูปตัววี (V-Shaped oval rings หรือ Oval rings) และแหวนแคปซูลรูปตัววี (V-shaped capsule rings หรือ Capsule rings) ที่จัดวางอย่างต่อเนื่องในท่อกลม การประเมินตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนถูกทำเช่นเดียวกับการทดสอบแหวนรูปตัววี นอกจากนี้ยังทำการหาขนาดและการจัดวางที่เหมาะสมของแหวนที่ให้ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ประกอบไปด้วย

1. เพื่อศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อขนานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้ง โดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล (Thermocromic liquid crystal, TLC) ดูการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวและคำนวณค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะจุด (Local Nusselt number, Nu_x)
2. สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลข 3 มิติสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัวที่จัดวางอย่างต่อเนื่องในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส
3. สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อทดสอบลักษณะการไหล การถ่ายเทความร้อนและประเมินตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดในท่อกลมที่ใส่แหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี ที่มีรูปร่าง ขนาด และการจัดวางที่ต่างกัน โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ
4. เพื่อประเมินขนาดและการจัดวางที่เหมาะสมของแหวนที่ให้ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด
5. เพื่อสร้างสหสัมพันธ์ของพารามิเตอร์สำหรับใช้ทำนายการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การทดสอบการไหลในท่อสี่เหลี่ยม

สำหรับการทดสอบการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้งในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นการศึกษาเชิงทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากระยะห่างของแผ่นกั้นต่อการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้นถูกติดตั้งแบบชี้ทวนกระแสการไหล (Pointing upstream flow) ของไหลทดสอบคืออากาศ อัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) 6000-22,000 กำหนดพลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังด้านล่าง ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันตกคร่อมเป็นข้อมูลที่สภาวะคงตัว ส่วนการทดสอบการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีในท่อจัตุรัสเป็นการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบจากอัตราส่วนระยะลอยตัว (Detached-clearance ratio, CR) ต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อน แผ่นกั้นรูปตัววีถูกจัดวางแบบชี้ตามกระแสการไหล (Pointing downstream flow) กำหนดพลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังทั้ง 4 ด้าน อัตราการไหลของอากาศทดสอบอยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3000-20,000 เงื่อนไขขอบเขตที่ผนังกำหนดให้ไม่มีการสั่นไถลของอากาศที่ผนัง แผ่นกั้นกำหนดให้เป็นฉนวน การจำลองเชิงตัวเลขอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตแบบคาบที่การไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์

1.3.2 การทดสอบการไหลในท่อกลม

การทดสอบการไหลในท่อกลมใช้การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อทดสอบผลกระทบจากรูปร่างและขนาด รวมถึงการจัดวางแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววีต่อลักษณะการไหล และการถ่ายเทความร้อน ความดันลด การถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะถูกอธิบายอยู่ในรูปของ ค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor) ค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ย (Average Nusselt number) และ ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal enhancement factor, TEF) ตามลำดับ แหวนถูกจัดวางแบบชี้ทวนกระแสการไหล อากาศถูกใช้เป็นของไหลทดสอบ อัตราการไหลของอากาศทดสอบ อยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3000-20,000 เงื่อนไขขอบเขตที่ผนังกำหนดให้ไม่มีการสิ้นเปลืองของอากาศที่ผนังและกำหนดพลังค์ความร้อนคงที่ที่ผนังเป็นเงื่อนไขขอบเขตทางความร้อน ส่วนแหวนกำหนดให้เป็นฉนวน เงื่อนไขขอบเขตแบบสมมาตรถูกใช้เพื่อลดขนาดของแบบจำลองเหลือ 1 ใน 4 ส่วน การจำลองเชิงตัวเลขอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตแบบคาบที่การไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

การจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในการศึกษานี้ใช้โปรแกรม ANSYS Workbench เพื่อวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนใน 3 มิติที่สภาวะคงตัว สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศผ่านแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี ที่จัดวางอย่างต่อเนื่องในท่อกลม เริ่มจากกระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) โดยการใช้โปรแกรมประยุกต์ DesignModeler ในโปรแกรม ANSYS Workbench ร่วมกับโปรแกรม CATIA สร้างแบบจำลองเรขาคณิตที่ใช้เป็นขอบเขตการคำนวณ (Computational domain) ซึ่งเป็นข้อมูลผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chingtuaythong [2] โปรแกรมประยุกต์ Mesh ในโปรแกรม ANSYS Workbench ถูกใช้สำหรับการสร้างกริดให้กับขอบเขตการคำนวณ กระบวนการในขั้นตอนการวิเคราะห์ (Solver) สำหรับการหาค่าตอบเชิงตัวเลขถูกทำในโปรแกรมประยุกต์ FLUENT ในโปรแกรม ANSYS Workbench การจำลองเชิงตัวเลขของอากาศที่ไหลผ่านแหวนใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมหรือไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) และใช้ระเบียบวิธี QUICK ในการคำนวณ แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ ถูกใช้ร่วมกับวิธีการจำลองใกล้ผนัง (Near-wall modeling approach) แบบ enhanced wall treatment ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE ถูกใช้เพื่อคำนวณสนามความดัน (Pressure field) ผลการคำนวณเชิงตัวเลขถูกนำไปตรวจสอบกับสหสัมพันธ์ที่มีชื่อเสียงและผลการทดลองจากงานวิจัยของ Chingtuaythong [2] ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการนี้คือการประเมินพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแหวนที่ให้ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดีที่สุด สำหรับกระบวนการขั้นท้าย (Post-processor) เป็นการแสดงภาพพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนด้วยโครงสร้างการไหล (Flow topology)

1.5 สมมุติฐาน

- เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนใน 3 มิติที่สภาวะคงตัว (Steady state)
- การไหลเป็นแบบปั่นป่วนและไม่มีการอัดตัว (Turbulent and incompressible flow)
- เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์ (Fully developed flow and thermally fully developed condition)
- ไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของไหล (Body force)
- ไม่คิดการกระจายความหนืด (Viscous dissipation)
- ไม่มีแหล่งผลิตความร้อนภายในของไหล (No thermal energy sources within the fluid)
- คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลมีค่าคงที่ (Constant thermophysical properties)
- ไม่คิดการแผ่รังสี (Negligible radiation heat transfer)

1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 10 บท โดยสามารถกล่าวสรุปเนื้อหาของแต่ละบทได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต และขั้นตอนการทำวิจัย แสดงสมมุติฐานที่ใช้ในการศึกษา

บทที่ 2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการพัฒนาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สร้างและแก้ปัญหาการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อน กระบวนการแปลงสมการควบคุมจากกฎการอนุรักษ์พื้นฐานไปสู่ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่สามารถนำไปใช้คำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เนื้อหาเริ่มต้นจากแบบจำลองความปั่นป่วนและการเสริมวิธีการจำลองใกล้เคียงเข้ากับแบบจำลองความปั่นป่วน ระเบียบวิธีสำหรับการแปลงสมการควบคุมไปสู่ชุดของระบบสมการพีชคณิต (System of algebraic equations) ไปจนถึงการหาคำตอบของระบบสมการพีชคณิตเหล่านี้ ปัจจัยที่สำคัญต่อการวิเคราะห์การไหล การถ่ายเทความร้อนและการประเมินสมรรถนะ รวมถึงหลักการของการแสดงโครงสร้างการไหล

บทที่ 4 แสดงการทดลองเพื่อศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อขนานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้ง การแสดงชุดทดสอบ การใช้งานแผ่น TLC ต่อจากนั้นเป็นการแสดงการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัวในท่อจัดรูป

บทที่ 5 แสดงการกำหนดสิ่งสำคัญและจำเป็นสำหรับการจำลองเชิงตัวเลข การเตรียมการสำหรับการตรวจสอบและทดสอบแบบจำลองเรขาคณิตกับสหสัมพันธ์ที่เป็นที่ยอมรับและแสดงผลการทดลองของงานวิจัยที่นำมาตรวจสอบ เริ่มต้นเนื้อหาโดยการแสดงรายละเอียดการคำนวณให้กับปัญหาที่สนใจ กำหนดรูปร่าง ขนาด และการจัดวางแหวนรูปตัววี การกำหนดขอบเขตของการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขเริ่มต้น โครงสร้างกริดจากโปรแกรมประยุกต์ Mesh ในโปรแกรม ANSYS Workbench การกำหนดระเบียบวิธีที่ใช้ในการคำนวณและเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบ (Convergence criteria) การกำหนดขั้นตอนการตรวจสอบและทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วนกับสหสัมพันธ์ที่เป็นที่ยอมรับซึ่งจะถูกแสดงผลในบทที่ 6 เนื้อหาส่วนสุดท้ายเป็นการแสดงข้อมูลการทดลองของงานวิจัยที่นำมาร่วมตรวจสอบ

บทที่ 6 แสดงผลการตรวจสอบและทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วนที่เตรียมการมาจากบทที่ 5 การหาจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณ ผลการทดสอบการไหลในท่อกลมผิวเรียบกับสหสัมพันธ์ที่เป็นที่ยอมรับและผลการทดลอง การประเมินผลการสอบเชิงตัวเลขเมื่อมีการปรับเปลี่ยนเลขเรย์โนลด์ พารามิเตอร์ของรูปร่างและการจัดวางแหวนรูปตัววีเทียบกับผลการทดลอง

บทที่ 7 แสดงและอภิปรายผลการทดสอบเชิงตัวเลข การประเมินตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนของการไหลผ่านแหวนรูปตัววีที่จัดวางในลักษณะที่แตกต่างกัน รูปร่างและขนาดของแหวนที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด การแสดงผลของพฤติกรรมการไหลด้วยโครงสร้างการไหล

บทที่ 8 แสดงรายละเอียดการคำนวณให้กับปัญหา รูปร่าง ขนาด และการจัดวางแหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี ขอบเขตของการคำนวณ การกำหนดโครงสร้างกริด ขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น ระเบียบวิธีที่ใช้ในการคำนวณและเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบ แสดงและอภิปรายผลการทดสอบเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวน

บทที่ 9 แสดงผลการเปรียบเทียบการทดสอบเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี การหาขนาดที่เหมาะสมของแหวนที่ให้ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด แสดงสหสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ทำนายค่าตัวประกอบเสียดทาน การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสำหรับแหวนในช่วงการทดสอบที่สนใจ

บทที่ 10 สรุปผลการทดลองเชิงตัวเลขทั้งหมดของการศึกษา การแสดงข้อเสนอแนะอย่างเหมาะสมสำหรับแนวทางการศึกษาวิจัยในอนาคต

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

ภายหลังจากที่ได้ทราบที่มาและความสำคัญของการศึกษานี้จากบทที่ผ่านมาแล้ว เนื้อหาในบทนี้เป็นการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเฉพาะงานวิจัยที่เป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นท่อกลมและท่อสี่เหลี่ยมเท่านั้น โดยใช้อากาศหรือน้ำ เป็นสารทำงานในช่วงการไหลต่าง ๆ ทั้งที่เป็นการศึกษาเชิงทดลองและการศึกษาเชิงตัวเลข ด้วยตัวสร้างความปั่นป่วนลักษณะต่าง ๆ

2.1 การศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนจากการวัดอุณหภูมิด้วยแผ่น TLC

การวัดอุณหภูมิมีความสำคัญในการศึกษาปรากฏการณ์ของการถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะการวัดเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจำเป็นต้องติดตั้งจุดวัดเป็นจำนวนมากบนพื้นผิวและต้องทำการวัดค่าพร้อมกัน เทคนิคการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลบนวัสดุโดยตรงนั้น จำนวนข้อมูลการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทดสอบมีน้อย เนื่องจากการวัดอุณหภูมิที่ผิวเพียงบางจุด ทำให้บริเวณอื่นนอกเหนือจากตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลหรือที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบริเวณแคบ ๆ จะไม่สามารถทำการวัดอุณหภูมิได้ เทคนิคการวัดอุณหภูมิจากแผ่น TLC มีข้อได้เปรียบคือสามารถวัดการกระจายของอุณหภูมิได้ทั่วทั้งพื้นผิว ทำให้การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีความถูกต้องมากขึ้น ตัวอย่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่

Tanda [3] ทำการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานโดยใช้ครีบริปูทรงต่างกัน เพื่อสร้างความปั่นป่วนของการไหล โดยติดตั้งครีบริปูในช่องสี่เหลี่ยมที่มีผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ใช้แผ่น TLC เป็นอุปกรณ์สำหรับเทียบสีกับอุณหภูมิเพื่อดูพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน โดยการจัดวางครีบริปูให้มีลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ การจัดวางครีบริปูวางตั้งช่องขนาน 90° แบบต่อเนื่อง การจัดวางครีบริปูวางตั้งช่องขนาน 90° แบบไม่ต่อเนื่อง การจัดวางครีบริปูแบบตัววีขนาดมุม 45° แบบไม่ต่อเนื่องและการจัดวางครีบริปูแบบตัววีมุม 60° แบบไม่ต่อเนื่อง กำหนดอัตราส่วนระยะห่างต่อความสูงแผ่นกัน (p/e) เท่ากับ 8 อัตราส่วนความสูงแผ่นกันต่อขนาดความโตท่อ (e/D_h) เท่ากับ 0.15 และ 0.09 อัตราส่วนความสูงแผ่นกันต่อความสูงของช่องสี่เหลี่ยม (e/H) เท่ากับ 0.15 และ 0.25 ค่า Re อยู่ระหว่าง 8900-28,500

Tanda [4] ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่องทางการไหลพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ 5 มีการติดตั้งครีบริปูเยื้องยาวต่อเนื่องทำมุมปะทะ 45° ศึกษาทั้งกรณีติดตั้งบนพื้นผิวด้านล่างอย่างเดียวและติดตั้งทั้งพื้นผิวด้านบนและด้านล่าง ให้ความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ทำการศึกษาในช่วงค่า $Re=9000-35,500$ ค่า $e/D=0.09$ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการปรับเปลี่ยนค่า p/e ในช่วง 6.66-20.0 เพื่อหาค่าที่เหมาะสม ตรวจสอบค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้ TLC ผลที่ได้สรุปว่าการติดตั้งครีบบังที่ผนังให้ความร้อนเพียงด้านเดียวที่ค่า $p/e=13.33$ ค่า TEF อยู่ในช่วง 1.25-1.45 ซึ่งสูงกว่าการติดตั้งครีบบังทั้งสองด้านที่มีค่า TEF สูงสุดอยู่ในช่วง 1.02-1.20 ที่ $p/e=10$

2.2 การประยุกต์ใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส แผ่นกั้นและครีบบังต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น แผ่นกั้นวางเอียง ครีบบังรูปตัววีแบบแยกตัว แผ่นกั้นรูปตัววี [5-12] มักเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้เพื่อสร้างความปั่นป่วน ตัวอย่างของการศึกษาแสดงอยู่ในตารางที่ 2.1

Lee et al. [5] ทำการทดลองเกี่ยวกับรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดตั้งครีบบังรูปตัววีมุมปะทะ 60° แบบครีบบังเดี่ยวจัดวางต่อเนื่องและครีบบังรูปตัววีมุม 45° แบบหลายครีบบังจัดวางสลับแถว เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) เท่ากับ 38.4, 50 และ 75 ค่า e/D เท่ากับ 0.04, 0.06 และ 0.078 ค่า $p/e=10$ ผลการทดลองพบว่าครีบบังรูปตัววีมุม 60° แบบครีบบังเดี่ยวจัดวางต่อเนื่องให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าครีบบังรูปตัววีทำมุม 45° แบบหลายครีบบังจัดวางสลับแถว ในขณะที่กำลังงานของปั๊มสำหรับการไหลผ่านครีบบังรูปตัววีมุม 45° แบบหลายครีบบังจัดวางสลับแถวมีค่าต่ำกว่าครีบบังรูปตัววีมุม 60° แบบครีบบังเดี่ยวจัดวางต่อเนื่อง

Promvongse and Kwankaomeng [6] ศึกษาการทดสอบเชิงตัวเลขสำหรับการถ่ายเทความร้อนในช่องทางการไหลแบบ 3 มิติ มีการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีมุม 45° ขวางการไหลที่ผนังด้านบนและผนังด้านล่างในช่องทางการไหล โดยมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูง (W/H) เท่ากับ 2 และอัตราส่วนความสูงครีบบัง (b/H) อยู่ระหว่าง 0.05-0.30 ทดสอบที่ $Re=100-1200$ จากการศึกษาพบว่า การจัดวางครีบบังแบบซี่ทวนกระแส ค่า TEF สูงสุดเท่ากับ 2.6 ที่ $b/H=0.15$ และค่า TEF สูงสุดเท่ากับ 2.75 ที่ $b/H=0.20$ สำหรับกรณีการจัดวางครีบบังแบบซี่ตามกระแส

Jedsadaratanachai and Boonloi [7] นำเสนอลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีมุมทำมุม 30° แบบซี่ตามกระแส โดยติดตั้งทั้งผนังด้านบนและด้านล่างของช่องทางการไหล กำหนด $BR=0.05-0.25$ และ $PR=1-2$ ค่า $Re=100-1200$ จากการศึกษาตรวจสอบพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันสูงกว่าช่องทางการไหลแบบผิวเรียบ ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 3.2 ที่ $Re=1200$, $PR=1$ และ $BR=0.10$

ตารางที่ 2.1 การศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ผู้วิจัย	สารทำงาน	อุปกรณ์	เงื่อนไข	f/f_0	Nu/Nu_0	TEF	ผลการศึกษา
[8]	อากาศ	Inline baffles	Re=100-1000 $\alpha=45^\circ$, PR=1, BR=0.05-0.3	2-66	1.2-9	1.2-2.6	TEF สูงสุด=2.6 ที่ BR=0.2
[9]	อากาศ	Inline V-shaped discrete thin ribs	Re=10,000-25,000, $\alpha=60^\circ$, PR=0.0625, BR=0.025-0.125 แผ่นกั้นซี่ทวนกระแสด้านไหล	6.5-29.5	2.7-4.7	1.1-1.8	TEF สูงสุด=1.8 ที่ BR=0.075, Re=10,000
[10]	อากาศ	V-baffles	Re=200-2000 $\alpha=45^\circ$, PR=1-2, BR=0.1-0.25 แผ่นกั้นซี่ตามกระแสด้านไหล	1.1-225	1-21	1-3.8	TEF สูงสุด=3.8 ที่ BR=0.2, PR=1.5
[11]	อากาศ	Finned tapes	Re=4000-20,000, $\alpha=30^\circ$, PR=1-2, BR=0.1-0.3	2-55	1.5-6.5	1.0-1.95	TEF สูงสุด=1.95 ที่ BR=0.2, PR=1.0, Re=4000
[12]	อากาศ	Finned tapes	Re=4000-23,000, $\alpha=30^\circ$, PR=1-3, BR=0.1-0.3	14-109	2.0-6.3	1.0-1.95	ค่า TEF สูงสุด=1.8 ที่ BR=0.2, PR=1.0, Re=4130

2.3 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนาน

อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนที่นิยมใช้ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในช่องขนานมีลักษณะคล้ายกับในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งนอกจากจะมีครีบบริและแผ่นกั้นลักษณะต่าง ๆ แล้วยังมีการประยุกต์การติดตั้งปีกรูปทรงต่าง ๆ เช่น ปีกสามเหลี่ยมหรือปีกสี่เหลี่ยม ร่วมกับครีบบริหรือแผ่นกั้น

Olsson et al. [13] ศึกษาารูปแบบการไหล ความดันตกคร่อมและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมติดครีบบริ ที่ Re=500-15,000 ค่า AR=1:8 ทำการทดสอบครีบบริต่าง ๆ ได้แก่ ครีบบริถูกติดในแนวตัดกันบนผนังท่อที่อยู่ตรงข้าม ครีบบริถูกติดในแนวขนานบนผนังท่อที่อยู่ตรงข้าม ครีบบริถูกติดในแนวตัดกันบนผนังท่อที่อยู่ตรงข้าม ครีบบริถูกติดในแนวขนานบนผนังท่อที่อยู่ตรงข้าม และติดครีบบริแบบสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางการบนผิวท่อที่อยู่ตรงข้าม การถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมถูกแสดงด้วยตัวประกอบเจ (Colburn heat transfer factor) และตัวประกอบความเสียดทานแฟนนิง (Fanning friction factor) ผลการศึกษาพบว่า ครีบจัดวางสลับกันให้ค่าตัวประกอบของการถ่ายเทความร้อนโคลเบิร์น และค่าตัวประกอบความเสียดทานแฟนนิงมากกว่าการติดตั้งครีบรูปแบบอื่น

Ahn et al. [14] ศึกษาผลกระทบของครีบรูปแบบต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยม โดยทำการศึกษารูปทรงของครีบ 5 แบบ ได้แก่ ครีบรูปสี่เหลี่ยม ครีบรูปสามเหลี่ยม ครีบวงกลม ครีบครึ่งวงกลมทรงต่ำ และครีบครึ่งวงกลมทรงสูง โดยทำการศึกษาที่ความสูงครีบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ 0.0476 อัตราส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงครีบ (P/e) เท่ากับ 8 และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ 2.33 และรูปแบบครีบ จากการทดลองพบว่า ครีบรูปสามเหลี่ยมมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ตามด้วยครีบสี่เหลี่ยม ส่วนครีบวงกลมและครึ่งวงกลมมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน ที่ $Re=10,000$ แผ่นครีบสามเหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบ 3 เท่า โดยรวมแล้ว ครีบสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุด ตามด้วยครีบสี่เหลี่ยม

Gao and Sunden [15] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่ของไหลไหลผ่าน โดยท่อสี่เหลี่ยมได้รับความร้อนคงที่ผนังด้านหนึ่ง ท่อถูกติดตั้งแผ่นกั้นรูปแบบต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานกับท่อผิวเรียบ รูปทรงของแผ่นกั้นประกอบไปด้วยแผ่นกั้นแบบเอียง แผ่นกั้นตัววีแบบซี่ตามกระแสการไหลและแผ่นกั้นตัววีแบบซี่ทวนกระแสการไหล กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ $e/D_h=0.06$, $p/e=10$ และ $\alpha=60^\circ$ ค่า Re ระหว่าง 1000-6000 ผลการทดลองพบว่า แผ่นกั้นตัววีแบบซี่ตามกระแสการไหลสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด

Momin et al. [16] ตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่ไหลในท่อสี่เหลี่ยมที่ใช้การทำความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ในท่อสี่เหลี่ยมติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีที่มุมต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบกับแผ่นกั้นแบบตรง $\alpha=90^\circ$ พารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ Re ซึ่งอยู่ระหว่าง 2500-18,000 ค่า $e/D_h=0.02-0.034$ และ $\alpha=30^\circ-90^\circ$ จากการทดลองพบว่าแผ่นกั้นรูปตัววีที่ $\alpha=60^\circ$ สามารถเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้สูงที่สุด ในขณะที่ $e/D_h=0.034$ สามารถเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้สูงที่สุด

Karwa [17] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานภายในท่อสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งครีบด้านเดียว โดยครีบเป็นครีบตรง ครีบเอียงและครีบรูปตัววี ติดตั้งในลักษณะยาวต่อเนื่องและแบบแยกตัว ท่อที่ทดสอบมีค่า $AR=7.19-7.75$, $e/D_h=0.0476-0.050$ และ $P/e=10$ ครีบรูปตัววีทำมุม 60° ทดลองในช่วง $Re=2800-15,000$ และความร้อนที่ให้กับท่อสี่เหลี่ยมเป็นแบบพลั๊กความร้อนคงที่ จากผลการทดลองพบว่า แผ่นครีบรูปตัววีติดตั้งแบบยาวต่อเนื่องมีค่าตัวประกอบเสียดทานสูง

ที่สุด มากกว่าท่อผิวเรียบ 3.40-3.92 เท่า ส่วนแผ่นครีบริบรูปตัววีที่ติดตั้งแบบแยกตัวมีค่าตัวประกอบความเสียดทานต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแผ่นครีบลักษณะอื่น และมีค่ามากกว่าท่อผิวเรียบ 2.35-2.47 เท่า

Kumar et al. [18] ทดลองเพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทาน ใช้พลังงานแสงอาทิตย์สำหรับสร้างความร้อน และอากาศเป็นตัวถ่ายเทความร้อน การทดลองติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัว W เพื่อสร้างความปั่นป่วน โดยการทดลองใช้อัตราการไหลของอากาศที่ $Re=3000-15,000$, $e/D_n=0.0168-0.0338$, $p/e=10$ และมุมของแผ่นกั้นรูปตัว W อยู่ระหว่าง $30^\circ-75^\circ$ ผลการทดลองพบว่า ในกรณีที่ Re ต่ำ ๆ จะมีค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงและจะลดลงที่เมื่อเพิ่มค่า Re สูงขึ้น โดยที่ $\alpha=60^\circ$ มีค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่น

Lee et al. [19] ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในช่องสี่เหลี่ยมที่มีแผ่นกั้นรูปตัววี ขวางการไหลเพื่อสร้างความปั่นป่วน โดยแผ่นกั้นรูปตัววีมีลักษณะการจัดวางต่างกัน แบบแรกใช้แผ่นกั้นรูปตัววีที่ $\alpha=60^\circ$ จัดวางแบบต่อเนื่อง ค่า $V/e=25$ เปรียบเทียบกับแผ่นกั้นรูปตัววีที่ $\alpha=45^\circ$ จัดวางสลับไม่ต่อเนื่อง ค่า $V/e=10$ โดยใช้ $p/e=10$ เช่นเดียวกัน กำหนดค่า $Re=10,000-30,000$ และอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างช่องสี่เหลี่ยม (W/H) เท่ากับ 3, 5, 6 และ 8 โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของแผ่นกั้นรูปตัววีทั้งสองแบบ

Sripattanapipat and Promvong [20] ใช้การคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลแบบราบเรียบในช่องสี่เหลี่ยมที่มีผนังให้ความร้อนแบบคงที่และติดตั้งแผ่นกั้นรูปเพชร เพื่อศึกษาผลของการสร้างความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นกับค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานรวมถึงสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อน กำหนดค่า Re อยู่ระหว่าง 100-600 แผ่นกั้นรูปเพชรทำมุมตั้งแต่ $5^\circ-35^\circ$ จากการศึกษาพบว่า แผ่นกั้นรูปเพชรที่ทำมุม 35° มีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

Promvong [21] ศึกษาพฤติกรรมการไหล การพาความร้อนและการสูญเสียต่าง ๆ ของอากาศที่ไหลผ่านช่องสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีแบบต่อเนื่อง 60° ขวางการไหลเพื่อสร้างความปั่นป่วน โดยกำหนดอัตราส่วน $e/H=0.10, 0.20$ และ 0.30 และอัตราส่วน $P/H=1, 2$ และ 3 ใช้ค่า Re ระหว่าง 5000-25,000 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แผ่นกั้นรูปตัววีสร้างความปั่นป่วนมากขึ้นทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น รวมถึงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.87 ที่ $P/H=1$ และ $e/H=0.10$

Hans et al. [22] ทดลองใช้แผ่นกั้นรูปตัววีขวางการไหล เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่รับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยศึกษาผลกระทบต่อค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทาน ใช้ค่า Re ระหว่าง 2000-20,000 อัตราส่วน $e/D_n=0.019-0.043$ อัตราส่วน $p/e=6-12$ อัตราส่วนความกว้างท่อสี่เหลี่ยมต่อความกว้างแผ่นกั้นคือ $W/w=1-10$ และ $\alpha=30^\circ-75^\circ$ ผลการทดลองพบว่า ที่ $e/D_n=0.043$ และ $p/e=8$ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด และที่ $\alpha=60^\circ$ พบว่ามีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lanjewar et al. [23] ทดลองติดตั้งแผ่นกั้นรูป W ที่ผนังท่อสี่เหลี่ยมเพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนให้กับเครื่องทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับการศึกษาที่ใช้อัตราส่วนความกว้างของแผ่นกั้นต่อความสูงของท่อ $W/H=8.0$ อัตราส่วน $p/e=10$ อัตราส่วน $e/D_h=0.018-0.03375$ และมุมของแผ่นกั้นรูป W อยู่ระหว่าง $30^\circ-75^\circ$ กำหนดค่า $Re=2300-14,000$ ผลจากการทดลองพบว่า ที่ $e/D_h=0.03375$ สามารถเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้สูงที่สุดและมุมของแผ่นกั้นรูป $W=60^\circ$ เป็นมุมที่ดีที่สุด

Singh et al. [24] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่ผิวถูกให้ความร้อนหนึ่งด้านแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ซึ่งมีครีบน้ำตัดวงกลมติดตั้งอยู่ในช่องทางไหลหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กำหนดค่า p/e อยู่ในช่วง 4-12 ค่า e/D อยู่ในช่วง 0.015-0.043 ครีปที่ใช้ศึกษาทำมุม $\alpha=30^\circ-75^\circ$ กับทิศทางการไหล โดยทำการทดสอบอิทธิพลของความกว้างช่องเปิด (g/e) และตำแหน่งของช่องเปิด (d/w) ในช่วง 0.5-2 และ 0.2-0.8 ตามลำดับ ศึกษาในช่วงค่า $Re=3000-18,000$ จากผลการทดลองสรุปว่า ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 เท่ากับ 3.04 และ 3.11 เท่าของท่อผิวเรียบ ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 สูงที่สุดคือ $d/w=0.65$, $g/e=1.0$, $p/e=8$, $\alpha=60^\circ$ และ $e/D=0.043$

Peng et al. [25] ศึกษาการพาความร้อนในช่องสี่เหลี่ยมที่มีแผ่นกั้นลักษณะต่าง ๆ ขวางการไหลเพื่อสร้างความปั่นป่วนประกอบด้วย แผ่นกั้นตรงแบบต่อเนื่อง 90° แผ่นกั้นตรงแบบไม่ต่อเนื่อง 90° แผ่นกั้นรูปตัววีแบบต่อเนื่อง 45° แผ่นกั้นรูปตัววีแบบไม่ต่อเนื่อง 45° แผ่นกั้นรูปตัววีแบบต่อเนื่อง 60° และแผ่นกั้นรูปตัววีแบบไม่ต่อเนื่อง 60° ใช้ค่า Re ระหว่าง 6000-15,000 เพื่อศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทานและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงผลการศึกษาในกรณีต่าง ๆ เปรียบเทียบกับการทดลอง ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า การติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีแบบต่อเนื่อง 45° มีการถ่ายความร้อนดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การติดตั้งแผ่นกั้นรูปแบบอื่น

Alam et al. [26] ศึกษาผลกระทบของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีซึ่งติดอยู่กับผนังด้านหนึ่งของท่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ แผ่นกั้นรูปตัววีถูกเจาะรูให้มีลักษณะแตกต่างกันไป ซึ่งประกอบไปด้วย รูกกลม สี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดของรูเจาะอยู่ระหว่าง 0.6-1.0 อัตราส่วน $p/e=4-12$ อัตราส่วน $e/H=0.4-1.0$ และมุมของแผ่นกั้นอยู่ระหว่าง $30^\circ-75^\circ$ ที่ $Re=2000-20,000$ จากการทดลองประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดคือกรณีใช้รูเจาะรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วน $p/e=8$ อัตราส่วน $e/H=0.8$ และมุมของแผ่นกั้นเท่ากับ 60°

ตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดเงื่อนไขการทดสอบและผลลัพธ์ของการศึกษาอื่น ๆ [27-34]

ตารางที่ 2.2 การศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนในช่องขนาน

ผู้วิจัย	สารทำงาน	อุปกรณ์	เงื่อนไข	f/f_0	Nu/Nu_0	TEF
[27]	อากาศ	Periodic grooves	$Re=6000-18,000$ $PR=2, B/H=0.5-1.75$	-	-	0.95-1.33
[28]	อากาศ	Ribs	$Re=4000-16,000,$ $AR=15, P=40 \text{ mm},$ $e=6 \text{ mm}$	20-70	2.6-4.4	0.78-1.1
[29]	อากาศ	Rib-grooved	$Re=3000-10,000$ $AR=20, PR=6.6, 10,$ $13.3, e=3 \text{ mm}$	-	-	0.8-1.08
[30]	อากาศ	Isosceles triangular ribs	$Re=5000-22,000$	2-86	1.6-4.2	0.88-1.34
[31]	อากาศ	Ribs and winglet	$Re=5000-22,000$	1.8-6	1.6-2.5	1.0-1.65
[32]	อากาศ	Wedge ribs and winglet	$Re=5000-20,000$	3-44	1.3-3.8	0.92-1.31
[33]	อากาศ	Ribs and delta-winglet	$Re=5000-22,000$	4.6-10.2	2.3-2.55	1.2-1.39
[34]	อากาศ	Z-shaped baffles	$Re=4000-20,400$	6.5-36	5.3-7.7	1.42-2.25

2.4 การศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม

การศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมได้ถูกทำการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก เนื่องจากท่อในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนใหญ่เป็นท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงกลม อีกทั้งตัวสร้างความปั่นป่วนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีลักษณะที่หลากหลาย ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ถูกคิดค้นและติดตั้งในท่อกลมได้แก่ ไบพิต ลวดขด และอื่น ๆ

2.4.1 ไบพิต

การใช้ไบพิตเป็นที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในขณะที่มีการสูญเสียความดันที่ต่ำ [35-42] พารามิเตอร์ที่สำคัญของไบพิตคือ อัตราส่วนการบิด ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของความยาวหนึ่งช่วงการบิดต่อความกว้างของแผ่นบิด โดยศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนการบิดต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ ไบพิตยังถูกปรับปรุงในลักษณะเชิงการติดตั้งและรูปทรง การปรับปรุงในลักษณะเชิงการติดตั้งคือการเปลี่ยนลักษณะของการติดตั้ง เช่นการเปลี่ยนอัตราส่วนการบิดจากที่มีอัตราส่วนการบิดคงที่ให้มีมีความสั้นยาวต่างกัน การติดตั้งในบริเวณช่วงทางเข้าของท่อทดสอบ หรือติดตั้งไบพิตที่มีอัตราส่วนการบิดต่างกัน โดยมีการเว้นระยะระหว่างขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของใบปิดใบกับผิวด้านในของท่อที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีการออกแบบใบปิดในลักษณะที่มีแกนกลางยึดใบปิด โดยลักษณะของใบปิดมีลักษณะคล้ายกับสกรูเกลียว และทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอัตราส่วนการบิดและลักษณะการจัดวาง เช่นการเว้นระยะของสกรูเกลียว หรือการออกแบบใบปิดในลักษณะที่มีการบิดสลับแกน นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงใบปิดด้วยวิธีการตัดหรือเจาะทั้งที่บนตัวหรือที่ขอบของใบปิดให้เป็นรอยหยักหรือเป็นรูปทรงต่าง ๆ เช่น รูปครึ่งวงกลม รูปสี่เหลี่ยม รูปตัววี หรือแม้กระทั่งการตัดแล้วทำการพับส่วนที่ถูกตัดให้มีลักษณะเป็นปีกที่ขอบของใบปิด ส่วนการตัดหรือเจาะที่บนใบปิดเป็นรูปทรงต่าง ๆ เช่น การเจาะรูรูปวงกลม เป็นต้น เงื่อนไขการทดสอบและผลลัพธ์ของการศึกษาเกี่ยวกับใบปิดแสดงอยู่ในตารางที่ 2.3

2.4.2 อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนอื่น ๆ

นอกเหนือจากการใช้ใบปิดที่เป็นที่นิยมสำหรับใช้ในการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อกลมแล้ว ยังมีอุปกรณ์อื่น ๆ [43-56] ที่ถูกใช้สำหรับเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อกลม รายละเอียดเงื่อนไขการทดสอบและผลลัพธ์ของการศึกษาสำหรับอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนชนิดต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 2.4

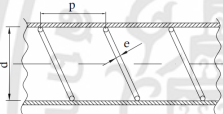

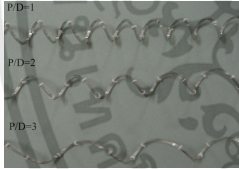


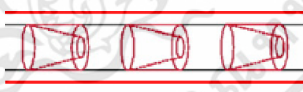
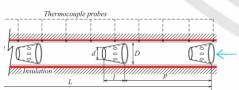

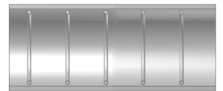
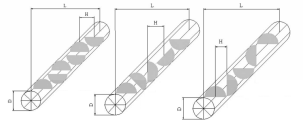
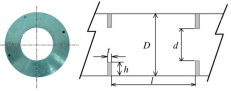
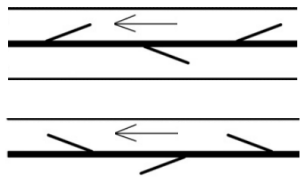
ตารางที่ 2.3 การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อกลมด้วยใบปิด

ผู้วิจัย	สารทำงาน	อุปกรณ์	เงื่อนไข	f/f_0	Nu/Nu_0	TEF
[35]	อากาศ	Broken twisted tape	Re=1000-40,000 P/d=1, 1.5, 2, 2.5, ∞	2.0-4.7	1.28-2.40	0.99-1.80
[36]	อากาศ	Serrated twisted tape	Re=5000-20,000 P/d=1.56, 1.88, 2.81, ∞	2.0-78.0	1.31-4.80	0.65-1.60
[37]	อากาศ	Short-length twisted tape	Re=4000-20,000 y/w=4, LR=0.29, 0.43, 0.57, 1.0	1.6-2.4	1.1-1.37	0.85-1.05
[38]	อากาศ	Dual twisted tape	Re=4000-19,000 y/w=3, 4, 5 s/D=0.75, 1.5, 2.25	2.13-2.55	2.32-2.46	0.8-1.1
[39]	อากาศ	Serrated twisted tape	Re=4000-20,000 y/w= 4, d/W=0.1, 0.2, 0.3, w/W=0.1, 0.2, 0.3	2.49-3.33	1.32-1.42	0.97-1.17

ตารางที่ 2.3 การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อกลมด้วยไบบิต (ต่อ)

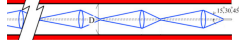


ผู้วิจัย	สารทำงาน	อุปกรณ์	เงื่อนไข	f/f_0	Nu/Nu_0	TEF
[40]	อากาศ	Twisted tape separately from wall	$Re=5132-24,989$ $y/D=2, 2.5, 3, 3.5,$ $4, c/D=0.0178,$ 0.0357	2.2-4.0	1.36-2.75	1.12-1.76
[41]	อากาศ	Helically twisted tapes	$Re=6000-20,000$ $p/D=1, 1.5, 2$ $y/W=2, 2.5, 3$	4-46	1.73-2.72	0.6-1.3
[42]	อากาศ	Perforate twisted tape	$Re=7200-49,800,$ $R_p=1.6\%, 4.5\%,$ $8.9\%, 14.7\%$	2.1-4.6	2.1-4.4	1.28-1.59

ตารางที่ 2.4 การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อกลมด้วยอุปกรณ์อื่น

ลักษณะการทดสอบ	อุปกรณ์	ผู้วิจัย	ลักษณะการทดสอบ	อุปกรณ์	ผู้วิจัย
	Wire coils	[43]		Equilateral triangle coiled wire	[44]
	Coiled wire separately from tube wall	[45]		Wire coil and twisted tape	[46]
	Conical-ring turbulators	[47]		Conical-nozzle turbulators	[48]
	Perforated conical-rings	[49]		V-nozzle turbulators	[50]
	Circular cross sectional rings	[51]		Half circle baffled	[52]
	Circular-ring turbulator	[53]		Louvered strip	[54]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อกลมด้วยอุปกรณ์อื่น (ต่อ)

ลักษณะการทดสอบ	อุปกรณ์	ผู้วิจัย	ลักษณะการทดสอบ	อุปกรณ์	ผู้วิจัย
	Diamond-shaped	[55]	 	Propeller type swirl generators	[56]

โดยทั่วไปแล้ว การทดลองเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนในระบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน เนื่องจากมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมากที่ส่งผลต่อการออกแบบท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งพฤติกรรมทางความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนค่อนข้างมีความซับซ้อน การศึกษาที่ใช้ข้อได้เปรียบในเรื่องความยืดหยุ่นของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากการทดสอบด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลข (Numerical simulation) เพื่อทำนายช่วงของพารามิเตอร์สำหรับการนำแผ่นกันและแหวนไปใช้งาน ซึ่งไม่สามารถทำได้ง่ายตายในการทดสอบกับเครื่องต้นแบบ

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื้อหาของบทนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สร้างและหาผลเฉลยของการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลและการถ่ายเทความร้อน เนื้อหาส่วนแรกคือการแปลงสมการควบคุมจากกฎการอนุรักษ์พื้นฐาน แนะนำแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence modeling) ที่ถูกใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข ต่อจากนั้นเป็นการอธิบายระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมสำหรับสร้างสมการพีชคณิตที่ถูกแปลงรูปจากสมการควบคุม (Governing equations) เงื่อนไขขอบเขตที่จำเป็นสำหรับการจำลองเชิงตัวเลข ถัดไปเป็นระเบียบวิธีการแก้ปัญหา (Solution procedure) ที่ใช้ในการศึกษานี้ เนื้อหาส่วนต่อไปเป็นการแสดงปัจจัยที่สำคัญต่อการวิเคราะห์การไหล การถ่ายเทความร้อนและการประเมินสมรรถนะเชิงความร้อน เนื้อหาส่วนสุดท้ายเป็นการแสดงหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการสร้างภาพผลลัพธ์ของผลเฉลยเชิงตัวเลข

3.1 สมมุติฐานของการไหลและสมการควบคุม

สมการควบคุมเป็นสมการพื้นฐานสำหรับการจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้แก้ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อน สมการเหล่านี้แสดงกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์สำหรับของไหลหนืดที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible viscous fluid) สมการควบคุมนี้ได้มาจากกฎการอนุรักษ์มวล กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม และกฎการอนุรักษ์พลังงาน

3.1.1 สมมุติฐานของการไหลและการถ่ายเทความร้อน

การศึกษาวิธีการเชิงตัวเลขสำหรับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในทอกลมนี้อยู่ภายใต้สมมุติฐานดังต่อไปนี้

- เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนใน 3 มิติที่สภาวะคงตัว
- การไหลเป็นแบบปั่นป่วนและไม่มีการอัดตัว
- เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์
- ไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของไหล
- ไม่คิดการกระจายความหนืด
- ไม่มีแหล่งผลิตความร้อนภายในของไหล
- คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลมีค่าคงที่
- ไม่คิดการแผ่รังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้สมมุติฐานที่กำหนด สมการควบคุมการไหลประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum equation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy equation) สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

3.1.2 สมการความต่อเนื่อง

สมการความต่อเนื่องหรือสมการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass equation) ได้มาจากการสมดุลมวลของของไหลที่ผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุมในสนามการไหล เนื่องจากมวลของไหลไม่สูญหาย ไม่สามารถสร้างหรือทำลาย อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในชิ้นส่วนย่อยจึงเท่ากับอัตราสุทธิจากการไหลออก สำหรับการไหลแบบ 3 มิติที่สภาวะคงตัวและของไหลไม่ถูกอัดขณะไหล สมการอนุรักษ์มวลสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{div } \mathbf{U} = 0 \quad (3.1)$$

3.1.3 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมได้มาจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน กล่าวคืออัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของของไหลเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำกับอนุภาคนั้น แรงที่กระทำต่ออนุภาคแบ่งเป็นแรงกระทำที่ผิว (Surface force) และแรงเนื่องจากน้ำหนักของของไหล ตัวอย่างของแรงกระทำที่ผิวได้แก่ แรงเนื่องจากความดันและแรงเนื่องจากความหนืดที่กระทำกับผิวของปริมาตรควบคุม (Control volume) ส่วนแรงเนื่องจากน้ำหนักของของไหล ได้แก่ แรงโน้มถ่วง แรงหมุนหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ที่กระทำกับอนุภาคของของไหล เป็นต้น สำหรับการไหลที่ไม่มีกอร์อัดตัวใน 3 มิติ สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในรูปเกรเดียนต์ (Gradient) ของความเร็วสำหรับแต่ละทิศทางสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

โมเมนตัม-x

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) \quad (3.2)$$

โมเมนตัม-y

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) \quad (3.3)$$

โมเมนตัม-z

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยพจน์ทางด้านซ้ายมือของสมการอนุรักษ์โมเมนตัมคืออัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม และแรงเฉื่อย พจน์แรกทางด้านขวามือคือแรงเนื่องจากความดัน พจน์ที่ 2 คือแรงเนื่องจากความหนืด สำหรับการศึกษานี้ไม่คิดแรงกระทำในปริมาตร เช่น แรงโน้มถ่วง แรงหมุนหนีศูนย์กลางที่กระทำต่ออนุภาค ของไหล ดังนั้นจึงไม่มีพจน์ของการสร้างหรือการสูญหายของโมเมนตัม (Momentum source term)

3.1.4 สมการอนุรักษ์พลังงาน

สมการอนุรักษ์พลังงานได้มาจากการใช้กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับปริมาตรควบคุมในสนามการไหล อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลรวมของอัตราความร้อนที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเกิดงานสุทธิที่กระทำต่ออนุภาคสำหรับการไหลของของไหลที่ไม่อัดตัว เนื่องจากระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วสูง (Large velocity gradients) [57] แรงเสียดทานในของไหลสามารถตัดทิ้งได้ สมการอนุรักษ์พลังงานในรูปแบบที่ไม่คิดการกระจายความหนืด สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{U}) = \text{div}(k \text{ grad} T) \quad (3.5)$$

โดยที่ i คือพลังงานภายในของปริมาตรควบคุม ($i = c_p T$) พจน์ทางด้านซ้ายมือของสมการอนุรักษ์พลังงานเป็นการพาความร้อน พจน์ด้านขวามือคือการนำความร้อน ในการจำลองเชิงตัวเลข สมการอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้เป็นสมการควบคุมที่ถูกหาปริพันธ์ภายใต้ปริมาตรควบคุมในบริเวณที่สนใจ หรือในขอบเขตการคำนวณ

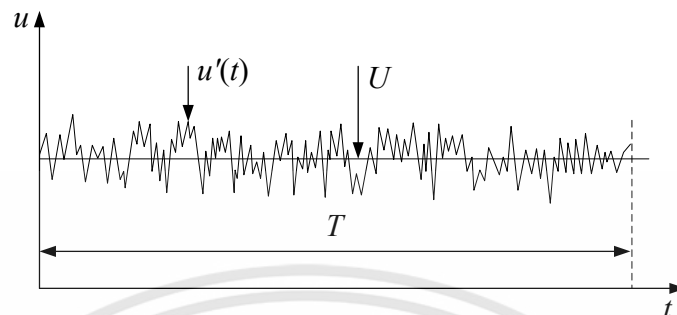
หากใช้ชุดสมการควบคุมการไหลข้างต้นร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม จะสามารถนำไปวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบได้ แต่เมื่อนำสมการควบคุมดังกล่าวมาวิเคราะห์ปัญหาที่มีการไหลแบบปั่นป่วน จะค่อนข้างมีความยุ่งยากในการวิเคราะห์ เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของการไหลแบบปั่นป่วนนั้นมีความซับซ้อน เนื้อหาในส่วนถัดไปจะนำเสนอพื้นฐานการไหลแบบปั่นป่วน เพื่อนำไปสู่สมการของแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้คำนวณเชิงตัวเลข ระเบียบวิธีการแปลงรูปสมการควบคุมให้เป็นฟังก์ชันของจุดต่อ (Discretization approach)

3.2 แบบจำลองความปั่นป่วน

การไหลถูกพิจารณาว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ ๆ เมื่อเพิ่มเลขเรย์โนลด์ให้สูงขึ้น การไหลจะเปลี่ยนเป็นแบบปั่นป่วนที่มีความไม่เสถียรสูง เป็นการไหลที่ไร้ทิศทางแน่นอน ความเร็วและความดันเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาและสเกลความยาว (Length scales) [58] แม้ว่าจะมีเงื่อนไขขอบเขตที่คงตัวก็ตาม ตัวอย่างเช่น ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนใน 1 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบไปด้วยความเร็วผันแปร $u'(t)$ ที่เวลา t และ U เป็นความเร็วเฉลี่ยของการไหลตลอดช่วงเวลากการไหล ดังนั้น $u(t) = U + u'(t)$ ทั้งนี้ในทางปฏิบัติเรามักให้ความสนใจค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล เช่น ความเร็วเฉลี่ย ความดันเฉลี่ย หรือความเค้นเฉลี่ย เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติ (U, V, W, P และอื่น ๆ) กับค่าคุณสมบัติผันแปร (u', v', w', p' และอื่น ๆ) ของการไหล



รูปที่ 3.1 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนใน 1 มิติที่สภาวะคงตัว [58]

ความปั่นป่วนที่ปรากฏในการไหลเกิดขึ้นในงานด้านวิศวกรรมเป็นส่วนใหญ่ จึงไม่น่าแปลกใจที่มีงานวิจัยมากมายพยายามทุ่มเทให้กับวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อที่จะตรวจสอบผลกระทบเนื่องจากความปั่นป่วน มีวิธีการต่าง ๆ สำหรับการทำนายเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วน เช่น แบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับสมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวีย-สโตกส์ (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, RANS) แบบจำลองการไหลปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Direct numerical simulation, DNS) หรือการจำลองการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large eddy simulation, LES) สำหรับการศึกษานี้วิธี RANS ถูกใช้เพื่อจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

3.2.1 สมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวีย-สโตกส์

การไหลแบบปั่นป่วนสามารถทำนายพฤติกรรมของการไหลโดยวิธีการประมาณค่า (Approximation method) วิธีการนี้อาศัยค่าเฉลี่ยของสมการการเคลื่อนที่ โดยการสมมุติว่าการไหลเป็นแบบคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา วิธีหาค่าเฉลี่ยตามเวลา (Time average method) เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับความปั่นป่วนของการไหลซึ่งความเร็วเฉลี่ยไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ความไม่คงตัว (Unsteadiness) ทั้งหมดของการไหลถือเป็นส่วนหนึ่งของความปั่นป่วน วิธีการนี้นำไปสู่ชุดของสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations) ที่เรียกว่าสมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวีย-สโตกส์

จากรูปที่ 3.1 ลักษณะของความปั่นป่วนมีความผันผวนไม่แน่นอนอยู่รอบ ๆ ค่าเฉลี่ย ตัวแปรการไหลอื่น ๆ ทุกตัวสำหรับการไหลแบบคงตัว เช่น ความเร็วในทิศทางอื่น ความดัน อุณหภูมิ ความหนาแน่น ค่าคุณสมบัติของการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา $\varphi(t)$ คือผลรวมระหว่างค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติ (Time-average component) $\bar{\varphi}$ กับค่าคุณสมบัติผันแปร $\varphi'(t)$ ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ดังนั้น $\varphi(t) = \bar{\varphi} + \varphi'(t)$ โดยที่ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\bar{\varphi} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \varphi(t) dt \quad (3.6)$$

โดยที่ t เป็นเวลาและ T คือช่วงของเวลาเฉลี่ย (Averaging time interval) ช่วงเวลานี้ต้องกว้างมากพอที่จะเปรียบเทียบกับความกว้างของช่วงเวลาของความผันผวน (The typical time scale of the fluctuations) ดังนั้นค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติ $\bar{\varphi}$ จึงไม่ขึ้นอยู่กับเวลาที่การเฉลี่ยเริ่มต้นขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าการไหลเป็นแบบไม่คงตัว (Unsteady) การใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยตามเวลาจะไม่สามารถใช้ได้ แต่ต้องใช้วิธีเฉลี่ยค่าคุณสมบัติทุกค่าที่เวลา t (Ensemble average method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในโปรแกรม ANSYS Fluent [59] วิธีการเฉลี่ยค่าคุณสมบัติทุกค่าที่เวลา t สามารถเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\bar{\varphi} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varphi(t) \quad (3.7)$$

เมื่อ N คือจำนวนสมาชิกของเซต และ N ต้องมีจำนวนมากพอเพื่อที่จะกำจัดผลจากความผันผวน [58] วิธีการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds averaging) คือการนำกระบวนการของการเฉลี่ยเหล่านี้ไปใช้กับสมการนาเวียร์-สโตกส์จนได้ผลลัพธ์เป็นสมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวียร์-สโตกส์

3.2.2 กฎของผนัง

การมีอยู่ของผนังทำให้การไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลมที่บริเวณใกล้ผนังต่างจากการไหลปั่นป่วนแบบอิสระ (Free turbulent flow) การพิจารณาลักษณะการไหลที่ใกล้กับผนังนั้น กำหนดให้เลขเรย์โนลด์ปั่นป่วน (Turbulence Reynolds number) ขึ้นกับระยะทาง y ซึ่งเป็นระยะทางจากผนังคือ $Re_y = Uy/\nu$ ขณะที่ y ลดลงจนเป็นศูนย์ เลขเรย์โนลด์ที่ขึ้นกับ y จะลดลงจนเป็นศูนย์ด้วยเช่นเดียวกัน บริเวณใกล้กับผนังก่อนที่ระยะ y จะมีค่าเป็นศูนย์ จะมีค่าระยะ y ช่วงหนึ่งที่ทำให้ Re_y มีค่าเท่ากับ 1 ในช่วงระยะนี้อิทธิพลของแรงเฉือนจะเท่ากับแรงเฉื่อยหรือมากกว่าและจะมากกว่าที่ระยะใกล้ผนังมากขึ้น สรุปคือที่ไกลจากผนังออกไป การไหลได้รับอิทธิพลจากแรงเฉื่อย ส่วนบริเวณใกล้ผนังการไหลได้รับอิทธิพลจากแรงเฉือน และกระแสการไหลที่ไกลออกไปจะไม่มีผลกับบริเวณนี้ สำหรับการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนัง ความเร็วเฉลี่ยขึ้นอยู่กับระยะ y ความหนาแน่น ρ ความหนืด μ และความเค้นเฉือนที่ผนัง τ_w ดังนั้น $U = f(y, \rho, \mu, \tau_w)$ [60]

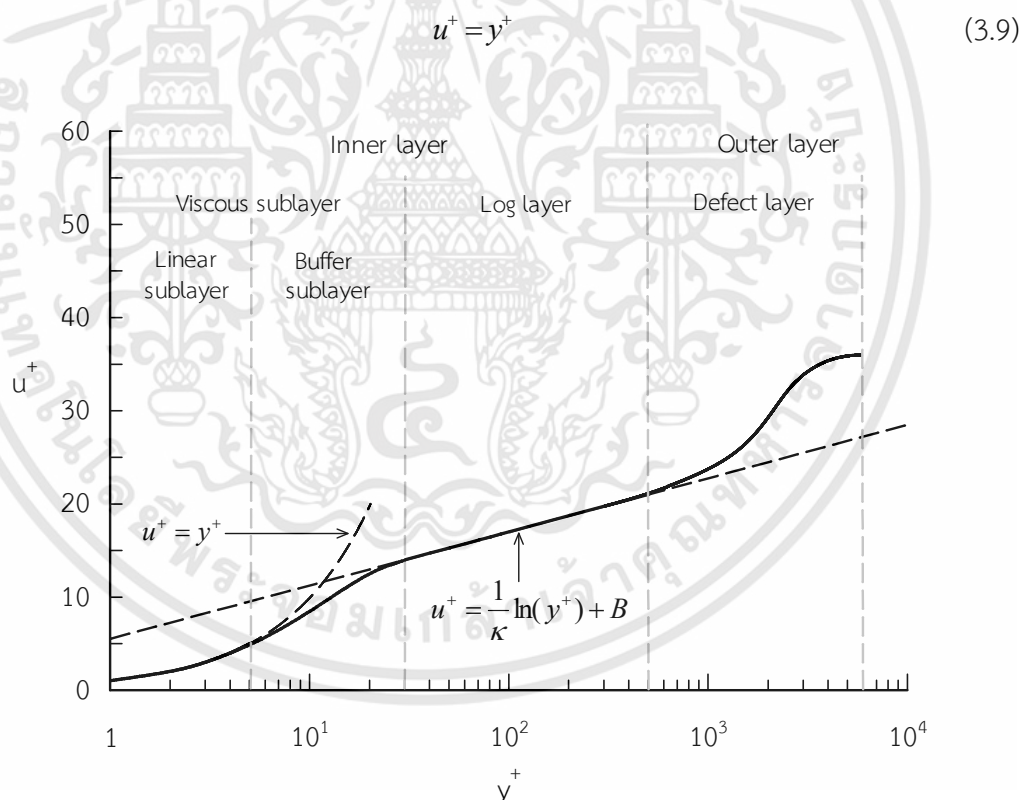
จากการวิเคราะห์มิติ กฎของผนัง (The law of the wall) กำหนดโดย

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} + f\left(\frac{\rho\tau_w y}{\mu}\right) = f(y^+) \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นเฉือนที่ผนังประกอบด้วยตัวแปรไร้มิติที่สำคัญ 2 กลุ่มคือ u^+ และ y^+ โดยความเร็วเฉื่อยหรือความเร็วเสียดทาน (Friction velocity) คือ $u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$ โดยที่ τ_w เป็นความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress)

รูปที่ 3.2 แสดงโปรไฟล์ความเร็วสำหรับชั้นขอบเขตของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent boundary layer) จากรูปแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วไร้มิติ u^+ กับระยะทางตั้งฉากกับผนัง y^+ สำหรับการไหลที่บริเวณผนัง ของไหลอยู่นิ่งที่ผิวของผนัง การหมุนวนจากความปั่นป่วนจะหยุดลงที่ผนัง ทำให้การไหลเกือบจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ พฤติกรรมของของไหลที่ติดผนังได้รับอิทธิพลจากความหนืด ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อโมเมนตัมและการถ่ายเทความร้อน ชั้นขอบเขตของการไหลเริ่มต้นจากชั้นย่อยหนืด (Viscous sublayer) ชั้นขอบเขตนี้มีความบางที่สุด ($y^+ < 5$) เป็นชั้นที่ติดกับพื้นผิว บางครั้งเรียกว่าชั้นย่อยเชิงเส้น (Linear sublayer) เนื่องจากความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างความเร็วและระยะห่างจากผนัง ความเค้นเฉือนที่มีอิทธิพลในบริเวณนี้มาจากความหนืดซึ่งมีค่าคงที่และเท่ากับค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว u^+ และ y^+ เขียนได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 โปรไฟล์ความเร็วสำหรับชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วน [61]

ถัดจากชั้นย่อยหนืด ช่วง $30 < y^+ < 500$ เป็นบริเวณที่มีความปั่นป่วนอยู่ใกล้กับผนัง ทั้งความหนืดและความปั่นป่วนมีผลต่อการไหล ความเค้นเฉือนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ตาม

ระยะทางจากผนัง ภายในชั้นนี้ความเค้นเฉือนคงที่และเท่ากับความเค้นเฉือนที่ผนัง ความสัมพันธ์ระหว่าง u^+ และ y^+ เขียนได้ดังต่อไปนี้

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B \quad (3.10)$$

ค่าตัวเลขต่าง ๆ ได้จากการทดลอง โดย κ คือ von Kármán's constant มีค่าเท่ากับ 0.4 และ B เป็นค่าคงที่ของการทดลอง (Empirical constant) ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาของชั้นย่อยหนืดมีค่าเท่ากับ 5.5 สำหรับผนังที่เป็นผิวเรียบ เนื่องจาก u^+ และ y^+ มีความสัมพันธ์แบบลอการิทึม การไหลในบริเวณนี้ถูกเรียกว่า log-law layer

ชั้นที่เป็นช่วงเปลี่ยนผ่านซึ่งอยู่ระหว่างชั้นย่อยหนืดกับชั้น log-law layer คือชั้น buffer layer หรือ blending region มีค่า $5 < y^+ < 30$ เป็นชั้นที่ทั้งความหนืดและความปั่นป่วนมีอิทธิพลต่อการไหลพอ ๆ กัน โดยชั้นย่อยหนืด ชั้น buffer layer และชั้น log-law layer เป็นชั้นย่อยที่อยู่ในบริเวณการไหลชั้นใน (Inner layer) ทั้งสิ้น

Outer layer เป็นบริเวณที่อยู่ชั้นนอกเหนือ log-law layer ซึ่งมีบริเวณใกล้เคียงกับแกนของการไหลที่ไกลจากผนังและได้รับอิทธิพลจากความเฉื่อยเป็นหลัก โดยการไหลเป็นอิสระจากความหนืด ชั้นที่อยู่นอกสุดนี้เรียกว่า defect layer หรือ law of the wake layer

3.2.3 แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้กล่าวไปแล้วเป็นการแสดงลักษณะของความปั่นป่วนที่ถูกใช้คำนวณการไหลแบบปั่นป่วนกับสมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวีย-สโตกส์ แบบจำลองความปั่นป่วนถูกใช้ทำนายความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stress) ซึ่งเป็นค่าความเค้นอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนและการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลาร์ (Scalar transport)

การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการไหลปั่นป่วนที่หลากหลาย ทำให้แบบจำลองสามารถใช้งานได้กับการไหลในหลายลักษณะ ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นฐานของการไหลที่ได้พัฒนาแบบจำลองขึ้นท่ามกลางแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งหลาย แบบจำลองที่อยู่ในความสนใจของนักวิจัยเนื่องจากมีความเหมาะสมและนิยมใช้ในปัจจุบันคือแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่มี 2 สมการสำหรับใช้พิจารณาพลวัตความปั่นป่วนและการสร้างหรือการทำลายความปั่นป่วน [61] โดยที่พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy, k) นั้นเป็นพจน์ของการสร้าง ส่วนอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเนื่องจากความหนืด (Viscous dissipation, ϵ) เป็นพจน์ของการทำลายในสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy equation)

แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ ให้ความสนใจกับกลไกที่ส่งผลต่อพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน โดยที่พลังงานจลน์ ณ ขณะเวลาหนึ่ง (Instantaneous kinetic energy, $k(t)$) ของการไหลแบบปั่นป่วนคือผลรวมของพลังงานจลน์เฉลี่ย (K) และพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k) พลังงานจลน์ ณ ขณะเวลาหนึ่งของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$k(t) = K + k \quad (3.11)$$

โดยที่ $K = \frac{1}{2}(U^2 + V^2 + W^2)$ และ $k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแบบจำลอง Renormalization-group $k-\varepsilon$ (RNG $k-\varepsilon$) ที่ถูกคิดขึ้นโดย Yakhot and Orszag ในปี 1992 [62] ซึ่งใช้วิธีเชิงสถิติอย่างแม่นยำที่เรียกว่า ทฤษฎี renormalization group แบบจำลองนี้มีความแม่นยำและเชื่อถือได้มากกว่าแบบจำลอง Standard $k-\varepsilon$ สำหรับช่วงการไหลที่กว้าง แบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ ถูกเสริมเข้าไปกับสมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวีย-สโตกส์ เพื่อใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลแบบปั่นป่วน สมการ RNG $k-\varepsilon$ สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้ [60]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div}[\alpha_k \mu_{eff} \text{grad } k] + \tau_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div}[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \text{grad } \varepsilon] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.13)$$

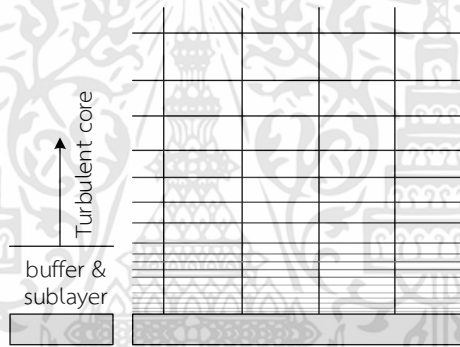
พจน์แรกทางด้านซ้ายมือของสมการ RNG $k-\varepsilon$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลง k หรือ ε พจน์ที่ 2 คือการเคลื่อนย้าย k หรือ ε โดยการพา ทางด้านขวามือของสมการประกอบไปด้วย การเคลื่อนย้าย k หรือ ε โดยการแพร่ อัตราการสร้าง k หรือ ε และอัตราการทำลายของ k หรือ ε ตามลำดับ

สมการ RNG $k-\varepsilon$ มีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องเนื่องกันคือ ความเค้นเรย์โนลด์ (τ_{ij}) ค่าความหนืดยังผล (Effective viscosity, μ_{eff}) และความหนืดหมุนวนเนื่องจากความปั่นป่วน (Eddy viscosity, μ_t) เมื่อ $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$ และ $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ โดยที่ $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ค่าคงที่ของแบบจำลอง α_k และ α_ε คือเลขพรานด์ยังผลผกผัน (Inverse effective Prandtl number) สำหรับค่า k และ ε มีค่าเท่ากับ 1.39 ส่วน C_μ เป็นตัวแปรไร้มิติมีค่าเท่ากับ 0.0845 สำหรับ $C_{1\varepsilon}^* = 1.42$ และ $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ตามลำดับ

3.2.4 แบบจำลองใกล้ผนังสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขต

แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ มีความแม่นยำสำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนในบริเวณแกนการไหลหรือในบริเวณที่ไกลออกไปจากผนัง วิธีการจำลองใกล้ผนังสำหรับการไหลแบบ

ปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขตได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ ในการแก้ปัญหาบริเวณใกล้ผนัง (Near-wall region) ที่การไหลได้รับอิทธิพลของความหนืด การวิเคราะห์ที่บริเวณใกล้ผนังสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผนังเป็นขอบเขตใช้วิธีการจำลองการไหลใกล้ผนังแบบ enhanced wall treatment ซึ่งเป็นวิธีที่มีพื้นฐานมาจากการรวมแบบจำลองการไหล 2 ชั้น (Two-layer model) เข้ากับวิธีฟังก์ชันผนังเสริม (Enhanced wall function) เพื่อรวมอิทธิพลจากความหนืดระหว่างบริเวณใกล้ผนังกับบริเวณที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามการเสริมการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการไหลใกล้ผนังด้วยวิธี enhanced wall treatment เข้ากับแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ ยังคงต้องใช้กริดที่มีความละเอียดมากพอเพื่อการคำนวณที่สมบูรณ์สำหรับการไหลในบริเวณใกล้ผนังและบริเวณการไหลในชั้นย่อยหนืด [63] ดังรูปที่ 3.3 แสดงวิธีการสร้างกริดสำหรับวิธีการจำลองใกล้ผนัง ถ้ากริดบริเวณใกล้ผนังมีความละเอียดเพียงพอสำหรับการคำนวณการไหลในชั้นย่อยหนืด ค่า y^+ ควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1



รูปที่ 3.3 วิธีการจำลองใกล้ผนัง [59]

สำหรับแบบจำลองการไหล 2 ชั้น ขอบเขตการไหลถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความหนืดกับบริเวณที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์

สำหรับบริเวณการไหลเป็นแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ [60] เลขเรย์โนลด์ปั่นป่วน $Re_y = \rho y \sqrt{k} / \mu \geq 200$ เมื่อ y คือระยะทางตั้งฉากจากผนังไปยังจุดศูนย์กลางเซลล์ ซึ่งกำหนดโดย $y \equiv \min_{\vec{r}_w \in \Gamma_w} \|\vec{r} - \vec{r}_w\|$ โดยที่ \vec{r} เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งของจุดที่อยู่ในสนาม \vec{r}_w เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งบนผนังขอบเขต Γ_w คือการรวมกันของผนังขอบเขตทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นระยะทาง y จึงถูกกำหนดให้ มีลักษณะเฉพาะในขอบเขตการไหลที่ซับซ้อนซึ่งมีหลายผนัง ความหนืดหมุนวนสำหรับการไหลในบริเวณนี้กำหนดตามแบบจำลอง RNG $k-\varepsilon$ คือ

$$\mu_{t,i} = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (3.14)$$

สำหรับบริเวณได้รับอิทธิพลจากความหนืด $Re_y \leq 200$ ความหนืดหมวนคำนวณจากสมการ

$$\mu_{t,v} = C_\mu^{1/4} \rho \sqrt{k} \ell \quad (3.15)$$

โดยที่ ℓ คือสเกลความยาว ความหนืดในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความหนืดกับบริเวณที่การไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ใช้สูตรการรวมกัน (Blending formula) เพื่อประเมินความหนืดหมวนในสมการความเค้นเรย์โนลด์คือ

$$\mu_t = F_\mu \mu_{t,\epsilon} + (1 - F_\mu) \mu_{t,v} \quad (3.16)$$

ฟังก์ชันการรวมกัน (Blending function) $F_\mu = F_\mu(Re_y)$ มีค่าเท่ากับ 0 ที่ผนัง และเท่ากับ 1 ในบริเวณที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ที่ $Re_y \gg 200$

สำหรับวิธีฟังก์ชันผนังเสริมเป็นวิธีการเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์การไหลทั่วบริเวณใกล้ผนัง ซึ่งจำเป็นต้องใช้กฎของผนังที่รวมความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นในชั้นการไหลแบบราบเรียบและความสัมพันธ์แบบลอการิทึมในชั้นการไหลแบบปั่นป่วนเข้าเป็นสมการเดียว ตามสมการ [59]

$$u^+ = e^{\Gamma} u_{lam}^+ + e^{-\Gamma} u_{urb}^+ \quad (3.17)$$

เมื่อ u_{lam}^+ และ u_{urb}^+ คือกฎของผนังสำหรับการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนตามลำดับ

3.3 ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม

ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมเป็นกระบวนการการแปลงสมการควบคุมของการเคลื่อนย้ายซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยที่ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ให้อยู่ในรูปแบบของสมการพีชคณิตที่สอดคล้องกับสมการการเคลื่อนย้ายคุณสมบัติ (ϕ) ที่จะสามารถนำไปคำนวณด้วยระบบคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งขนาดของระบบสมการพีชคณิตขึ้นกับจำนวนจุดต่อ การหาคำตอบของสมการพีชคณิตเหล่านี้มี 2 วิธี ได้แก่วิธีการตรง (Direct method) และวิธีการทางอ้อม (Indirect method) หรือที่เรียกอีกอย่างว่าวิธีการทำซ้ำ (Iteration method)

สมการเคลื่อนย้ายทั่วไปของคุณสมบัติ (ϕ) สำหรับปัญหาการพาและการแพร่กระจายแบบคงตัว (Steady convection-diffusion) ที่เกิดขึ้นกับการไหลของของไหล สามารถเขียนเป็นสมการที่ไม่มีพจน์ของความไม่คงตัว (Transient term) ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้ [60]

$$\text{div}(\rho u \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (3.18)$$

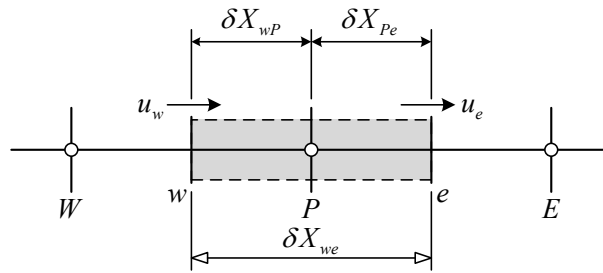
พจน์ทางด้านซ้ายมือของสมการเป็นพจน์ของการพา (Convection term) ความเร็ว u เป็นตัวแทนของความเร็วของการไหลในทุกมิติ พจน์ทางด้านขวามือเป็นพจน์ของการแพร่ (Diffusion term) และพจน์ของการก่อกำเนิด (Source term) ที่แสดงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของคุณสมบัติ โดย Γ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ การใช้รูปปริพันธ์สำหรับสมการเคลื่อนย้ายเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาวิธีการเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม สมการเคลื่อนย้ายในรูปปริพันธ์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\int_A (\rho u \phi) \cdot n dA = \text{div} \int_A (\Gamma \text{grad} \phi) \cdot n dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (3.19)$$

สมการปริพันธ์แสดงการสมดุลของฟลักซ์ในปริมาตรควบคุม พจน์ทางด้านซ้ายมือของสมการเป็นฟลักซ์สุทธิของการพาความร้อน (Net convective flux) ส่วนพจน์ทางด้านขวามือประกอบไปด้วยของฟลักซ์สุทธิของการแพร่ (Net diffusive flux) และการสร้าง (เพิ่มขึ้น) หรือการทำลาย (ลดลง) ของคุณสมบัติภายในปริมาตรควบคุม ตามลำดับ

การเปลี่ยนรูปควบคุมไปสู่ระบบสมการพีชคณิตมี 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเริ่มจากการแบ่งขอบเขตหรือการสร้างปริมาตรควบคุมและการแปลงสมการควบคุม การแบ่งขอบเขตเป็นการสร้างขอบเขตของการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งกระบวนการนี้รู้จักกันว่าเป็นการสร้างกริด ขอบเขตถูกแบ่งเป็นส่วนย่อย ๆ ซึ่งเรียกว่าปริมาตรควบคุม (Control volumes, CVs) หรือเซลล์ (Cells) หากเป็นการจำลองแบบขึ้นกับเวลา (Transient simulation) คาบเวลาจะถูกแบ่งเป็นช่วงเวลาย่อย ๆ ด้วย เช่นเดียวกัน การแปลงสมการควบคุมถูกทำไปพร้อม ๆ กันกับการแบ่งขอบเขต ซึ่งทำให้สมการควบคุมถูกแปลงไปเป็นสมการแปลงรูปที่อยู่ในระบบสมการพีชคณิตที่สามารถแก้ด้วยวิธีการตรงหรือวิธีการทางอ้อม

ขั้นตอนแรกของการแปลงสมการควบคุมคือการแบ่งขอบเขต สำหรับปัญหาพื้นฐาน ให้พิจารณาปริมาตรควบคุมใน 1 มิติที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3.4 จุดต่อ P เป็นจุดที่อยู่ตรงกลางปริมาตรควบคุม จุดต่อข้างเคียงกำหนดเป็น W และ E ผิวหน้าของปริมาตรควบคุมกำหนดเป็น w และ e ตามลำดับ ขอบเขตหรือผิวหน้าของปริมาตรควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างจุดต่อข้างเคียง ดังนั้นแต่ละจุดต่อจะถูกล้อมรอบด้วยปริมาตรควบคุมหรือเซลล์



รูปที่ 3.4 ปริมาตรควบคุมรอบจุดต่อ P [60]

ขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนสำคัญของระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมคือการแปลงสมการเคลื่อนย้ายไปสู่สมการแปลงรูป เมื่อหาปริพันธ์ของสมการการเคลื่อนย้ายในสมการที่ 3.18 ภายใต้อปริมาตรควบคุม โดยไม่พิจารณาพจน์ของการก่อกำเนิด จะได้

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w = \left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e - \left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w \quad (3.20)$$

เมื่อหาปริพันธ์ของสมการความต่อเนื่อง (3.1) จะได้

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w = 0 \quad (3.21)$$

โดยที่ตัวแปร $F = \rho u$ และ $D = \Gamma / \delta x$ ถูกกำหนดเพื่อแสดงฟลักซ์การพาของมวลต่อหน่วยพื้นที่ (Convective mass flux) และฟลักซ์การแพร่ (Diffusion conductance) ที่ผิวหน้าของเซลล์ตามลำดับ กำหนดให้พื้นที่ของผิว $A_w = A_e = A$ สมการแปลงรูปสำหรับการพาและการแพร่กระจายที่เกิดจากการหาปริพันธ์ (3.20) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F_e \phi_e - F_w \phi_w = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (3.22)$$

และสมการความต่อเนื่องที่ได้มาจากการหาปริพันธ์ (3.21) สามารถเขียนได้เป็น

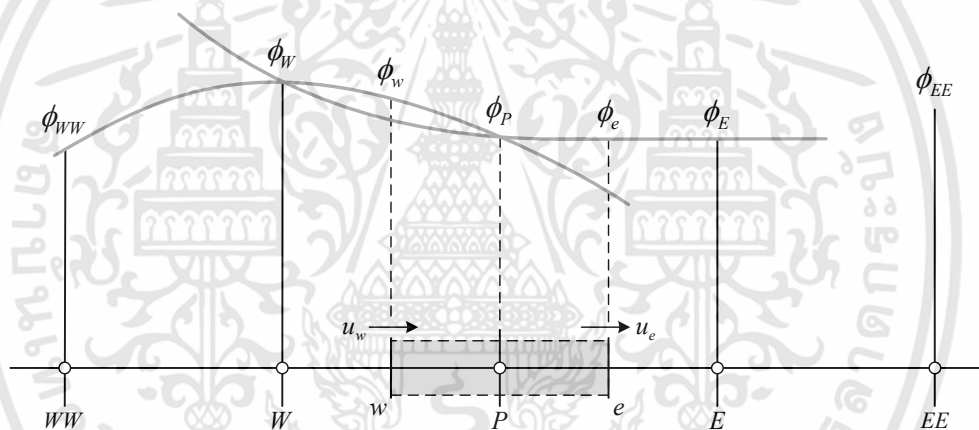
$$F_e - F_w = 0 \quad (3.23)$$

การแก้สมการที่ 3.22 จำเป็นต้องคำนวณค่าคุณสมบัติ ϕ ที่ผิวหน้า e และ w ด้วยวิธีการประมาณค่าคุณสมบัติที่ผ่านเข้าออกปริมาณควบคุม ซึ่งเนื้อหาส่วนถัดไปเป็นการแสดงระเบียบวิธี (Scheme) การประมาณค่าคุณสมบัติดังกล่าว

3.3.1 ระเบียบวิธี QUICK

การศึกษานี้ใช้ระเบียบวิธี QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics) เพื่อประมาณค่าคุณสมบัติ ระเบียบวิธีนี้คิดขึ้นโดย Leonard ในปี 1979 [64] ระเบียบวิธี QUICK (QUICK scheme) ใช้จุด 3 จุดที่อยู่ต้นกระแสการไหล (Upstream) กับการประมาณค่าในช่วงกำลังสองถ่วงน้ำหนัก (Upstream-weighted quadratic interpolation) ที่ผิวหน้าเซลล์ ค่าของคุณสมบัติที่ผิวหน้าเซลล์ได้จากฟังก์ชันกำลังสองที่ผ่านจุดต่อ 2 จุดที่ล้อมแต่ละด้านของผิวหน้าเซลล์ (Bracketing node) และอีก 1 จุดทางด้านต้นกระแส สำหรับกริดแบบสม่ำเสมอ (Uniform grid) ค่าของคุณสมบัติ ϕ ที่ผิวหน้าเซลล์ระหว่างจุดต่อที่ล้อมผิวหน้าเซลล์ทั้ง 2 จุด คือ i และ $i-1$ กับจุดต่อต้นกระแส $i-2$ นั้นสามารถประมาณค่าโดย [60]

$$\phi_{face} = \frac{6}{8}\phi_{i-1} + \frac{3}{8}\phi_i + \frac{1}{8}\phi_{i-2} \quad (3.24)$$



รูปที่ 3.5 เส้นประมาณของฟังก์ชันกำลังสอง [60]

ระเบียบวิธี QUICK สำหรับปัญหาการพาและการแพร่กระจายใน 1 มิติสำหรับจุดต่อ P ที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3.5 เป็นการไหลไปในทิศทางที่เป็นบวก (Positive flow) เมื่อความเร็ว $u_w > 0$ ค่าของคุณสมบัติ ϕ ที่ผิวหน้าเซลล์ฝั่งตะวันตก w คือ $\phi_w = \frac{6}{8}\phi_w + \frac{3}{8}\phi_P - \frac{1}{8}\phi_{WW}$ โดยที่จุดต่อ W และ P คือจุดต่อที่ล้อมผิวหน้า w ส่วน WW คือจุดต่อทางด้านต้นกระแส เมื่อความเร็ว $u_e > 0$ ค่าของคุณสมบัติ ϕ ที่ผิวหน้าเซลล์ฝั่งตะวันออก e คือ $\phi_e = \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_E - \frac{1}{8}\phi_w$ โดยที่จุดต่อ P และ E คือจุดต่อที่ล้อมผิวหน้า e ส่วน W คือจุดต่อทางด้านต้นกระแส สมการ ϕ_e และ ϕ_w จะถูกนำไปแทนในสมการแปลงรูปสำหรับการพาและการแพร่กระจายในสมการที่ 3.22 ต่อจากนั้นสมการจะถูกแก้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่กึ่งกลาง (Central coefficient) และสัมประสิทธิ์ข้างเคียง (Neighbor coefficient) สำหรับการไหลในทิศทางที่เป็นลบ (Negative flow) สามารถกระทำได้ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้น สมการแปลงรูปสำหรับการพาและการแพร่กระจายแบบ 1 มิติในรูปแบบมาตรฐานตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเบียบวิธี QUICK ที่รวมสัมประสิทธิ์เข้าไว้ด้วยกันเพื่อให้ครอบคลุมการไหลได้ทั้งทิศทางที่เป็นบวก และเป็นลบ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_e \phi_e + a_{ww} \phi_{ww} + a_{ee} \phi_{ee} \quad (3.25)$$

สัมประสิทธิ์ที่กึ่งกลางและสัมประสิทธิ์ข้างเคียงในสมการที่ 3.25 แสดงสรุปอยู่ในตารางที่

3.1

ตารางที่ 3.1 สัมประสิทธิ์ที่กึ่งกลางและสัมประสิทธิ์ข้างเคียงตามระเบียบวิธี QUICK

สัมประสิทธิ์ที่กึ่งกลาง	สูตร
a_p	$a_w + a_e + a_{ww} + a_{ee} + (F_e - F_w)$
สัมประสิทธิ์ข้างเคียง	
a_w	$D_w + \frac{6}{8} \alpha_w F_w + \frac{1}{8} \alpha_e F_e + \frac{3}{8} (1 - \alpha_w) F_w$
a_{ww}	$-\frac{1}{8} \alpha_w F_w$
a_e	$D_e - \frac{3}{8} \alpha_e F_e - \frac{6}{8} (1 - \alpha_e) F_e - \frac{1}{8} (1 - \alpha_w) F_w$
a_{ee}	$\frac{1}{8} (1 - \alpha_e) F_e$
หมายเหตุ	โดยที่ $\alpha_w = 1$ สำหรับ $F_w > 0$ และ $\alpha_e = 1$ สำหรับ $F_e > 0$ $\alpha_w = 0$ สำหรับ $F_w < 0$ และ $\alpha_e = 0$ สำหรับ $F_e < 0$

สำหรับระเบียบวิธีแบบ QUICK นั้น พลักซ์ที่ผิวหน้าเซลล์ถูกคำนวณโดยการประมาณค่าแบบยกกำลังสองระหว่างจุดที่ล้อมผิวหน้าและจุดต่อทางด้านต้นกระแสเสมอ ดังนั้นจึงมีความต่อเนื่องและสอดคล้องกับหลักอนุรักษ์ [65] พลักซ์ที่ผ่านเข้าออกผิวหน้าเซลล์สมดุลกันตลอด เนื่องจากระเบียบวิธีนี้อยู่บนพื้นฐานของฟังก์ชันกำลังสอง ความแม่นยำจากความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการตัดปลาย (Truncation error) อยู่ในลำดับที่ 3 ของอนุกรมเทย์เลอร์ บนกริดแบบสม่ำเสมอ ระเบียบวิธี QUICK มีความแม่นยำกว่าวิธีผลต่างกลางหรือระเบียบวิธีแบบผสม (Hybrid scheme) ขั้นตอนสุดท้ายของระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องหลังจากผ่านกระบวนการแปลงสมการควบคุมด้วยระเบียบวิธี QUICK คือการแก้ระบบสมการพีชคณิตของชุดสมการแปลงรูปสำหรับการพาและการแพร่กระจาย ซึ่งมี 2 วิธี ได้แก่วิธีการตรงและวิธีการทางอ้อมหรือวิธีการทำซ้ำ ตัวอย่างของวิธีการตรงคือกฎของคราเมอร์ (Cramer's rule) และการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian elimination) วิธีเหล่านี้ใช้ทรัพยากรค่อนข้างมาก วิธีทำซ้ำมีพื้นฐานจากการประยุกต์ของลำดับขั้นตอนการ

แก้ปัญหาอย่างง่ายโดยเริ่มจากการสมมติค่าของผลลัพธ์แล้วทำการคำนวณซ้ำจนนำไปสู่การลู่เข้าหาคำตอบ

3.4 ระเบียบวิธีการแก้ปัญหา

3.4.1 วิธีการคำนวณแบบ pressure-based approach

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์การไหลในสถานะคงตัวด้วยวิธีการคำนวณแบบ pressure-based approach ซึ่งเดิมที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์การไหลความเร็วต่ำแบบไม่อัดตัว (Low-speed incompressible flow) เพื่อแก้สมการควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีความสัมพันธ์เกี่ยวโยงกัน การคำนวณใช้วิธีการกระทำซ้ำเป็นรอบ จนกว่าคำตอบจะลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง ในปัจจุบันวิธีการคำนวณแบบ pressure-based ถูกเพิ่มขีดความสามารถในการวิเคราะห์การไหลที่มีความเร็วสูงและอัดตัวได้ (High-speed compressible flow)

เครื่องมือคำนวณแบบ pressure-based solver มีวิธีการคำนวณ 2 แบบ ได้แก่ การคำนวณแบบแยก (Segregated algorithm) และการคำนวณแบบร่วม (Coupled algorithm) การคำนวณแบบแยก ใช้ระเบียบวิธีในการแก้ปัญหาที่ซึ่งสมการควบคุมถูกหาคำตอบอย่างเป็นลำดับหรือแยกการคำนวณออกจากกัน โดยจะทำการคำนวณสมการโมเมนตัมเพื่อให้ได้ความเร็วแต่ละตัวออกมาก่อน หลังจากนั้นจึงคำนวณสมการแปลงรูปของความต่อเนื่อง (Discretised continuity equation) ในขณะที่การคำนวณแบบร่วม การคำนวณถูกทำควบคู่กันไป โดยรวมเอาการคำนวณสมการโมเมนตัมและสมการแปลงรูปของความต่อเนื่องไว้ในขั้นตอนเดียว ข้อได้เปรียบสำหรับการคำนวณแบบนี้คือ อัตราการลู่เข้าสู่คำตอบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับวิธีการคำนวณแบบแยก อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ใช้หน่วยความจำเพิ่มขึ้นมากถึง 2 เท่าเมื่อเทียบกับวิธีการคำนวณแบบแยก เนื่องจากต้องใช้หน่วยความจำในการเก็บทั้งสมการแปลงรูปโมเมนตัมและความต่อเนื่องเพื่อที่จะแก้สมการหาสนามความเร็วและสนามความดันพร้อมกัน ในขณะที่วิธีการคำนวณแบบแยกจะเก็บสมการไว้ในหน่วยความจำทีละสมการ

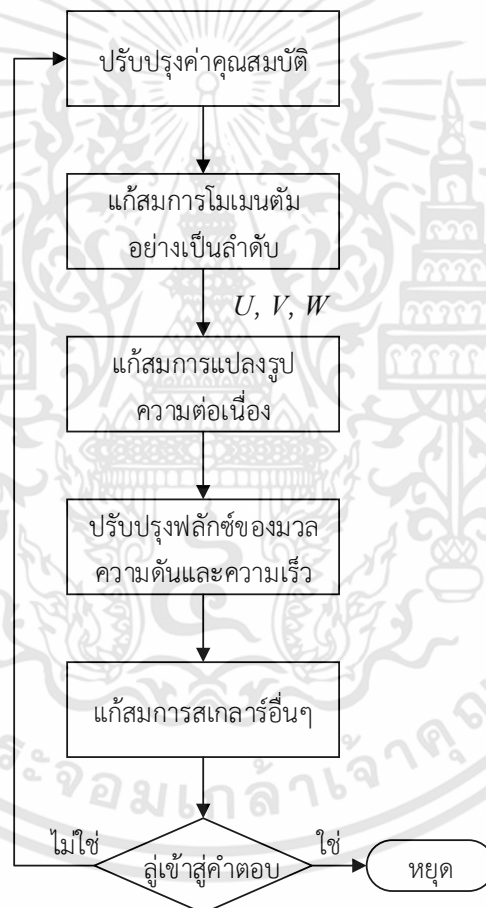
ระเบียบวิธีการคำนวณแบบ Pressure-based แบบแยกกันคำนวณ หรือ Pressure-based segregated algorithm ตัวแปรแต่ละตัวในสมการควบคุม เช่น องค์ประกอบของความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ จะถูกทยอยหาคำตอบทีละตัว ทำให้วิธีนี้หน่วยความจำถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสมการแปลงรูปถูกเก็บในหน่วยความจำเป็นครั้งไป อย่างไรก็ตาม การลู่เข้าสู่คำตอบค่อนข้างช้า เมื่อสมการถูกหาคำตอบด้วยวิธีการนี้ [59]

ขั้นตอนการทำซ้ำด้วยระเบียบวิธีของการคำนวณด้วยระเบียบวิธี pressure-based แบบแยกกันคำนวณ เป็นดังต่อไปนี้

1. ปรับค่าของคุณสมบัติล่าสุดของของไหลให้เป็นปัจจุบัน เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ความร้อนจำเพาะ ความหนืดหมุนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แก้สมการโมเมนตัมที่ละค่าจากค่าของความดันและฟลักซ์ของมวลที่ผิวหน้าเซลล์ที่ถูกปรับปรุงก่อนหน้าเพื่อให้ได้ค่าความเร็วในสนามการไหล
3. แก้สมการแปลงรูปของความต่อเนื่องในรูปแบบของสมการค่าแก้ความดัน (Pressure correction equation) จากสนามความเร็วและฟลักซ์ของมวลที่ได้มาก่อนหน้า
4. ปรับแก้ค่าฟลักซ์ของมวลที่ผิวหน้าเซลล์ ความดัน และสนามความเร็วจากตัวแก้ความดันที่ได้จากขั้นตอนที่ 3
5. แก้สมการสำหรับสเกลาร์อื่น ๆ ด้วยค่าปัจจุบันที่ได้จากการคำนวณตัวแปร
6. ตรวจสอบการลู่เข้าสู่คำตอบของสมการควบคุม
ขั้นตอนเหล่านี้จะกระทำไปจนกว่าคำตอบจะถึงเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบ



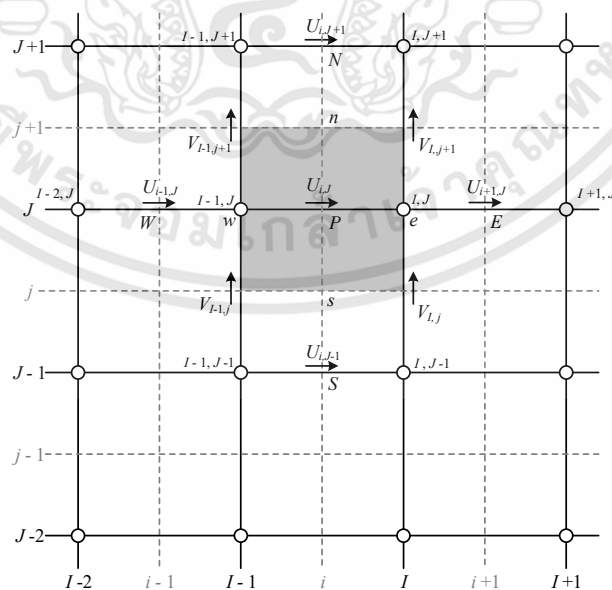
รูปที่ 3.6 ผังงานสำหรับระเบียบวิธี Pressure-based segregated [59]

3.4.2 ความสัมพันธ์ของความดันและความเร็วกับระเบียบวิธีแบบ SIMPLE

ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) เป็นระเบียบวิธีที่คิดขึ้นโดย Patankar and Spalding (1972) [66] ถูกใช้สำหรับหาความสัมพันธ์ของความดันและความเร็ว (Pressure-velocity coupling) กรณีการไหลแบบไม่อัดตัว ความดันจะไม่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของของไหล เพราะความหนาแน่นมีค่าคงที่ ความดันจึงเกี่ยวข้องกับความเร็ว ในสนามการไหล หากทราบความดันที่ทุกจุดบนสนามการไหลแล้ว ค่าความเร็วที่ได้จากสมการ โมเมนตัมก็จะสอดคล้องกับความเร็วในสมการความต่อเนื่อง การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วด้วยระเบียบวิธีแบบ SIMPLE นั้นใช้ระเบียบวิธีการคำนวณแบบ pressure-based แบบแยกกันคำนวณ เริ่มจากการสมมติค่าสนามความดัน ทำการหาค่าตอบของสมการโมเมนตัมและสมการค่าแก้ของสนามความดันที่แปลงมาจากสมการความต่อเนื่อง เพื่อนำค่าแก้ดังกล่าวไปปรับปรุงค่าของสนามความดันและสนามความเร็ว ต่อจากนั้นนำสนามความเร็วและสนามความดันที่ได้ใหม่นั้น กลับเข้าไปในสมการโมเมนตัมและสมการค่าแก้ของสมการความดันอีก เมื่อทำซ้ำจนกระทั่งคำตอบทั้งหมดคู่เข้าก็จะได้สนามความเร็วและสนามความดันที่เป็นไปตามกฎการเคลื่อนย้ายโมเมนตัมและกฎการอนุรักษ์มวล

จากที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้เกี่ยวกับระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมเริ่มต้นจากการแบ่งขอบเขต ตำแหน่งของปริมาตรควบคุมถูกวางให้จุดต่อ P เป็นจุดที่อยู่ตรงกลางซึ่งถูกล้อมรอบด้วยปริมาตรควบคุม การวางตำแหน่งปริมาตรควบคุมเช่นนี้ ความเร็วจะไม่สามารถถูกเก็บไว้ที่ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่เก็บค่าความดัน เพราะจะทำให้ไม่สามารถแสดงอิทธิพลของความดันต่อสนามการไหลได้ ถูกต้องนัก สมการแปลงรูปโมเมนตัม (Discretised momentum equation) จากแนวคิดของการใช้กริดเยื้อง (Staggered grid) ที่ใช้การวางตำแหน่งของกริดสำหรับคำนวณความเร็วและความดันให้เยื้องกันเพื่อคำนวณความดันและความเร็วจึงถูกนำมาใช้ โดยแยกพจน์ของความดันในสมการโมเมนตัมออกมาพิจารณาเป็นการเฉพาะ ปริมาตรควบคุมของกริดเยื้องสำหรับสมการโมเมนตัมในทิศทาง x แสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 [60]



รูปที่ 3.7 ปริมาตรควบคุมสำหรับความเร็ว u

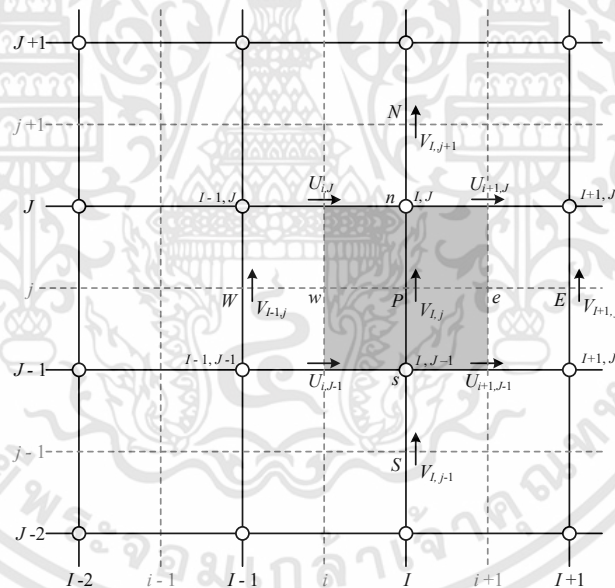
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแปลงรูปโมเมนตัมสำหรับความเร็ว u ที่ตำแหน่ง (i, J) กำหนดโดย [60]

$$a_{i,J}u_{i,J} = \sum a_{nb}u_{nb} + (p_{I-1,J} - p_{I,J})A_{i,J} + b_{i,J} \quad (3.26)$$

โดยที่ $b_{i,J}$ คือ พจน์ของการสร้างโมเมนตัม (Momentum source) $A_{i,J}$ เป็นพื้นที่ของผิวหน้าเซลล์ (ด้านตะวันออก e หรือตะวันตก w) ของปริมาตรควบคุมสำหรับความเร็ว u พจน์ $(p_{I-1,J} - p_{I,J})A_{i,J}$ คือแรงกระทำเนื่องจากความดันกับปริมาตรควบคุมของความเร็ว u นี้ พจน์ของเกรเดียนต์ของความดัน (Pressure gradient) ในสมการที่ 3.26 จะถูกแปลงโดยการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation) ระหว่างความดันที่จุดต่อบนขอบเขตของปริมาตรควบคุมสำหรับความเร็วในทิศทาง u สัมประสิทธิ์ $a_{i,J}$ และ a_{nb} สามารถคำนวณได้จากการแปลงรูปด้วยระเบียบวิธี QUICK สำหรับปัญหาการพาและการแพร่กระจาย ส่วนตัวห้อย nb แสดงถึงเซลล์ข้างเคียง

สมการแปลงรูปในทิศทางอื่นถูกกำหนดในลักษณะเดียวกัน ดังรูปที่ 3.8 แสดงปริมาตรควบคุมของกริดเฉียงสำหรับสมการโมเมนตัมในทิศทาง y



รูปที่ 3.8 ปริมาตรควบคุมสำหรับความเร็ว v

สมการแปลงรูปโมเมนตัมสำหรับความเร็ว v ที่ตำแหน่ง (I, j) กำหนดโดย

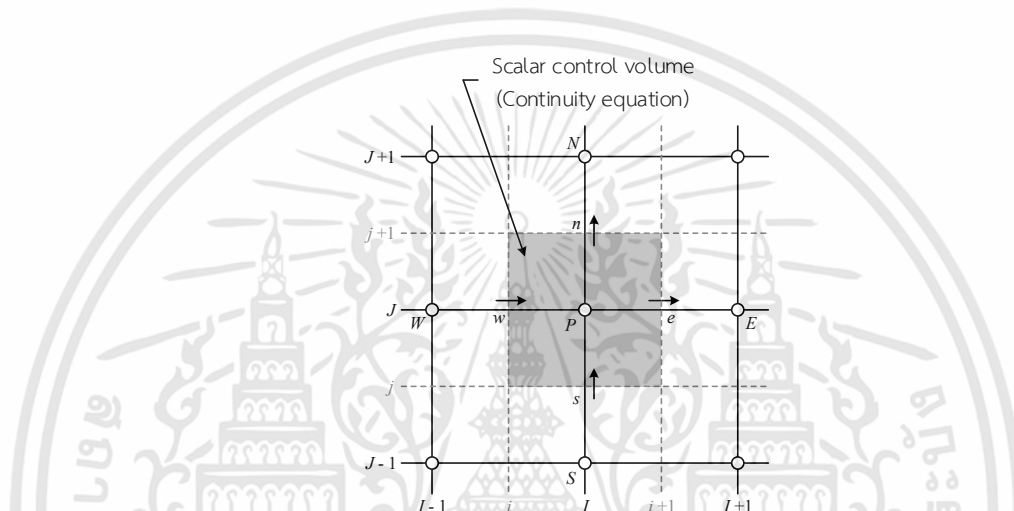
$$a_{I,j}v_{I,j} = \sum a_{nb}v_{nb} + (p_{I,J-1} - p_{I,J})A_{I,j} + b_{I,j} \quad (3.27)$$

การหาคำตอบของสมการการแปลงรูปดังกล่าวกระทำได้โดยกระบวนการทำซ้ำ หากกำหนดสนามความดัน p ให้กับสมการแปลงรูปโมเมนตัมสำหรับความเร็ว u และ v แล้ว จะสามารถหาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามความเร็วได้ หากสนามความดันมีความถูกต้องผลเฉลยของสนามความเร็วจะเป็นไปตามสมการความต่อเนื่อง

นอกจากการพิจารณาสมการโมเมนตัมที่ได้กล่าวไปแล้ว สนามความเร็วยังต้องสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง ปริมาตรควบคุมของปริมาณสเกลาร์ในรูปที่ 3.9 ถูกใช้สำหรับการแปลงสมการความต่อเนื่องให้เป็นสมการ

$$[(\rho u A)_{i+1,j} - (\rho u A)_{i,j}] + [(\rho u A)_{i,j+1} - (\rho u A)_{i,j}] = 0 \quad (3.28)$$



รูปที่ 3.9 ปริมาตรควบคุมของปริมาณสเกลาร์ที่ใช้สำหรับแปลงสมการความต่อเนื่อง

ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE เริ่มต้นจากกระบวนการประเมินค่าสนามความดันสมมุติ และเพื่อที่จะหาว่าสนามความเร็วตอบสนองอย่างไรกับสนามความดัน สมการโมเมนตัมในสมการที่ 3.26 และ 3.27 จึงถูกแปลงรูปเพื่อที่จะสามารถแทนค่าความดันสมมุติสำหรับใช้สำหรับหาค่าประกอบความเร็วสมมุติ (Guess velocity) u^* และ v^* ดังสมการต่อไปนี้

$$a_{i,j} u_{i,j}^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (p_{i-1,j}^* - p_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3.29)$$

$$a_{i,j} v_{i,j}^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + (p_{i,j-1}^* - p_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3.30)$$

เมื่อ p^* คือความดันสมมุติ (Guess pressure) ความสัมพันธ์ของค่าความดันที่ถูกต้อง (Correct pressure) p กำหนดจากความสัมพันธ์

$$p = p^* + p' \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ p' คือตัวปรับแก้ค่าความดัน (Pressure correction) ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างความดันที่ถูกต้องกับความดันสมมุติ ในทำนองเดียวกันความเร็วสามารถแสดงความสัมพันธ์คล้ายคลึงกันกับความดันคือ $u = u^* + u'$, $v = v^* + v'$ และ $w = w^* + w'$ เมื่อตัวแก้ความเร็ว (Velocity correction) u' , v' และ w' คือความแตกต่างระหว่างความเร็วที่ถูกต้อง (Correct velocity) u , v และ w กับค่าความเร็วสมมุติ u^* , v^* และ w^*

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ถูกต้อง ความเร็วสมมุติและตัวแก้ความเร็ว สนามความเร็วที่ถูกต้องถูกประมาณค่าโดยตัดพจน์ $a_{nb}u_{nb}^*$ และ $a_{nb}v_{nb}^*$ ออกจากสมการ เนื่องจากพจน์เหล่านี้ไม่ทำให้เกิดค่าผิดพลาดสำหรับการหาค่าตอบด้วยระเบียบวิธีแบบ SIMPLE สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} (p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (3.32)$$

$$v_{i,j} = v_{i,j}^* + \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} (p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (3.33)$$

$$u_{i+1,j} = u_{i+1,j}^* + \frac{A_{i+1,j}}{a_{i+1,j}} (p'_{i,j} - p'_{i+1,j}) \quad (3.34)$$

$$v_{i,j+1} = v_{i,j+1}^* + \frac{A_{i,j+1}}{a_{i,j+1}} (p'_{i,j} - p'_{i,j+1}) \quad (3.35)$$

สมการที่ 3.32-3.35 แสดงถึงความเร็วสมมุติตอบสนองต่อตัวแก้ค่าความดันเพื่อทำให้เกิดค่าความเร็วที่ถูกต้อง เมื่อแทนความเร็วที่ถูกต้องลงในสมการแปลงรูปความต่อเนื่องในสมการที่ 3.28 และจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของตัวแก้ค่าความดัน p' หรือที่เรียกว่าสมการแก้ค่าความดัน (Equation for pressure correction) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการ

$$a_{i,j}p'_{i,j} = a_{i+1,j}p'_{i+1,j} + a_{i-1,j}p'_{i-1,j} + a_{i,j+1}p'_{i,j+1} + a_{i,j-1}p'_{i,j-1} + b'_{i,j} \quad (3.36)$$

โดยที่ $a_{i,j} = a_{i+1,j} + a_{i-1,j} + a_{i,j+1} + a_{i,j-1}$ ซึ่งสัมพันธ์แต่ละตัวมีค่าดังตารางที่ 3.2 พจน์ $b'_{i,j}$ บ่งชี้ถึงความไม่สมดุลของมวล เนื่องจากสนามความเร็ว u^* และ v^* ที่ไม่ถูกต้อง

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการค่าแก้ความดัน

สัมประสิทธิ์	สูตร
$a_{I+1,J}$	$(\rho u A)_{I+1,J}$
$a_{I-1,J}$	$(\rho u A)_{I,J}$
$a_{I,J+1}$	$(\rho v A)_{I,J+1}$
$a_{I,J-1}$	$(\rho v A)_{I,J}$
b'_J	$(\rho u^* A)_{i,j} - (\rho u^* A)_{i+1,j} + (\rho v^* A)_{I,j} - (\rho v^* A)_{I,j+1}$

สมการค่าแก้ความดันอาจไม่ลู่เข้าสู่คำตอบในกระบวนการทำซ้ำ หากปราศจากค่าตัวประกอบภายใต้การผ่อนปรน (Under-relaxation factor) ความดันค่าใหม่ที่ถูกรับปรุง p^{new} สามารถเขียนเป็นสมการ

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \quad (3.37)$$

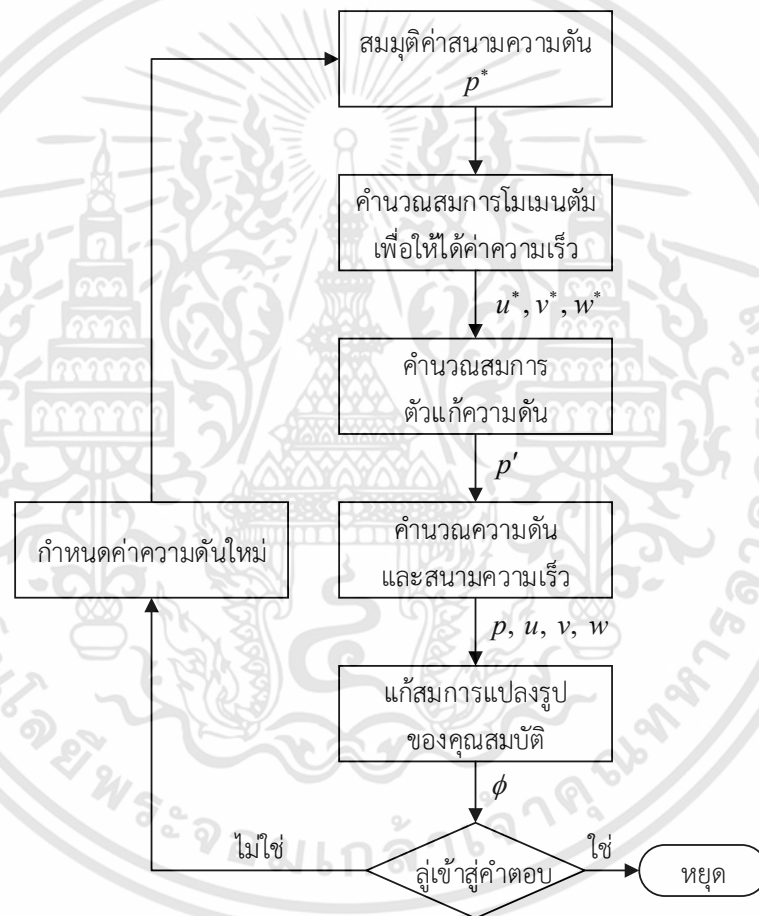
โดยที่ α_p เป็นค่าตัวประกอบภายใต้การผ่อนปรนความดัน (Pressure under-relaxation factor) ค่า α_p ที่มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงไม่มีการปรับปรุงค่าความดัน ซึ่งไม่ใช่สิ่งที่ต้องการ ดังนั้นการปรับปรุงค่าโดยใช้ค่า α_p อยู่ระหว่าง 0 กับ 1 จึงทำให้ความดันสมมุติเป็นสัดส่วนกับตัวแก้ค่าความดัน อย่างไรก็ตาม หากกำหนดให้สนามความดันสมมุติ p^* ค่อนข้างห่างจากคำตอบสุดท้าย ตัวแก้ค่าความดัน p' จะมีค่ามากเกินไปจะทำให้การคำนวณมีความเสถียร ดังนั้นเพื่อให้การสมมุติค่าความดันห่างจากคำตอบที่แท้จริงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่จะทำให้กระบวนการทำซ้ำเดินต่อไปข้างหน้า และทำให้การคำนวณมีความเสถียร การกำหนดค่าตัวประกอบภายใต้การผ่อนปรนสำหรับความดันและค่าอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับหาคำตอบของปัญหาการไหลในกระบวนการทำซ้ำที่ถูกกำหนดในโปรแกรม ANSYS Fluent ควรเริ่มจากการใช้ค่าเริ่มต้นของโปรแกรมก่อน หากค่าเริ่มต้นไม่สามารถทำให้การคำนวณลู่เข้าสู่คำตอบหรือมีความไม่เสถียรในระหว่างการคำนวณ การปรับค่าตัวประกอบภายใต้การผ่อนปรนจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัญหาของการไหล ประสบการณ์จากการศึกษาปัญหาการไหลที่ผู้ศึกษาได้ทำมาก่อนหน้าจะสามารถช่วยในการกำหนดค่าเหล่านี้เพื่อหาคำตอบของปัญหาได้

ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE ที่แสดงในรูปที่ 3.10 สามารถอธิบายเป็นลำดับได้ดังนี้ [60, 63]

1. สมมุติค่าสนามความดันโดยกำหนดค่าความดันสมมุติ p^*
2. แก้สมการแปลงรูปของโมเมนตัม โดยการใช้ค่าความดันสมมุติ p^* เพื่อให้ได้ค่าความเร็ว u^* , v^* และ w^*
3. คำนวณสมการแปลงรูปความต่อเนื่องในรูปของตัวแก้ความดัน p'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คำนวณค่าความดันที่ถูกต้อง p ใหม่ ตามสมการ $p = p^* + p'$ โดยเพิ่ม p' ไปรวมกับ p^*
5. คำนวณสนามความเร็ว u, v และ w จาก u^*, v^* และ w^* โดยใช้สมการตัวแก้ความเร็ว (Velocity correction formula)
6. แก้สมการแปลงรูปของคุณสมบัติ ϕ อื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ ค่าที่เกี่ยวข้องกับความปั่นป่วนที่มีผลต่อคุณสมบัติของของไหล
7. นำค่าความดันที่ถูกต้อง p เป็นค่าความดันสมมุติ p^* อันใหม่ ย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2 และทำซ้ำขั้นตอนทั้งหมดจนกระทั่งได้คำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ของการถูเข้าสู่อำนาจที่กำหนด



รูปที่ 3.10 ผังงานสำหรับการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็วด้วยขั้นตอนวิธี Pressure-based segregated กับระเบียบวิธีแบบ SIMPLE [60]

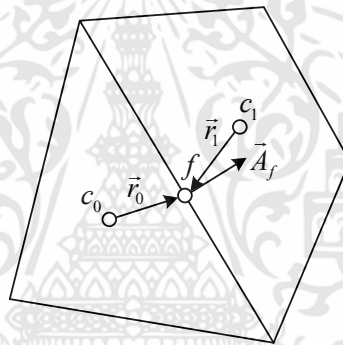
3.4.3 ระเบียบวิธีการประมาณค่าความดัน

เมื่อใช้ระเบียบวิธีการคำนวณแบบ pressure-based สำหรับการวิเคราะห์การไหลความเร็วต่ำแบบไม่อัดตัวในสภาวะคงตัวแล้ว สมการแปลงรูปโมเมนตัมต้องการค่าความดันของผิวหน้าที่อยู่ระหว่างเซลล์ c_0 และ c_1 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ระเบียบวิธีการประมาณค่าในช่วง (Interpolation เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

scheme) ถูกนำมาใช้คำนวณความดันที่ผิวหน้าเซลล์จากค่าที่ศูนย์กลางเซลล์ ระเบียบวิธีการประมาณค่าในช่วงสำหรับความดัน (Pressure Interpolation scheme) ที่ผิวหน้าเซลล์ใช้ระเบียบวิธีการประมาณค่าแบบเฉลี่ยกลางอันดับสอง (Central second-order interpolation) การประมาณค่าในช่วงของความดันที่ผิวหน้าเซลล์ P_f (Face pressure) ในสมการโมเมนต์กำหนดโดย

$$P_f = \frac{1}{2}(P_{c_0} + P_{c_1}) + \frac{1}{2}(\nabla P_{c_0} \vec{r}_{c_0} + \nabla P_{c_1} \vec{r}_{c_1}) \quad (3.38)$$

ตัวห้อย 0 และ 1 ใช้สำหรับอ้างอิงเซลล์ที่ใช้ผิวหน้า f ร่วมกัน P_{c_0} และ P_{c_1} คือค่าความดันที่เซลล์ c_0 และ c_1 ตามลำดับ ∇P_{c_0} และ ∇P_{c_1} คือเกรเดียนต์ของความดันที่เซลล์ c_0 และ c_1 ส่วน \vec{r}_{c_0} และ \vec{r}_{c_1} คือเวกเตอร์ตำแหน่งจากจุดเซนทรอยด์ของเซลล์ c_0 และ c_1 ไปยังจุดเซนทรอยด์ของผิวหน้าเซลล์ที่มีพื้นที่ \vec{A}_f



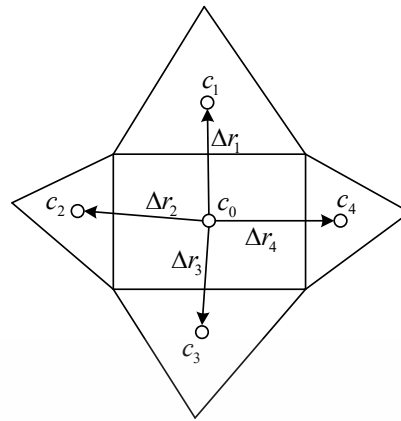
รูปที่ 3.11 ปริมาตรควบคุมที่ใช้แสดงการแปลงสมการการเคลื่อนย้ายปริมาณสเกลาร์

3.4.4 วิธีการประมาณค่าเกรเดียนต์

เกรเดียนต์ไม่เพียงแต่ใช้สำหรับหาค่าของสเกลาร์ที่ผิวหน้าเซลล์เท่านั้น แต่ยังใช้คำนวณการแพร่และอนุพันธ์ของความเร็ว เกรเดียนต์ของค่าคุณสมบัติ $\nabla \phi$ ถูกใช้เพื่อแปลงพจน์ของการพาและการแพร่ในสมการอนุรักษ์ของการไหล การประเมินค่าเกรเดียนต์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดจากข้อมูลที่ล้อมรอบแต่ละจุดต่อ (Least squares cell-based gradient evaluation) ถูกกำหนดให้เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น จากรูปที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงค่าระหว่างเซลล์ c_0 และ c_i ตามทิศทางของเวกเตอร์ Δr_i จากจุดเซนทรอยด์ของเซลล์ c_0 ไปยังเซลล์ c_i กำหนดโดย [59]

$$(\nabla \phi)_{c_0} \cdot \Delta r_i = \phi_{c_i} - \phi_{c_0} \quad (3.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การประเมินเกรเดียนต์จากจุดเซนทรอยด์ของเซลล์ [67]

หากเขียนสมการที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันสำหรับแต่ละเซลล์ที่ล้อมรอบเซลล์ c_0 ระบบสมการที่กระชับขึ้นสามารถเขียนเป็น

$$[J](\nabla\phi)_{c_0} = \Delta\phi \quad (3.40)$$

เมื่อ $[J]$ คือเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ (Coefficient matrix) การหาเกรเดียนต์ของเซลล์ $\nabla\phi = \phi_x\hat{i} + \phi_y\hat{j} + \phi_z\hat{k}$ ทำได้โดยการแก้ระบบสมการที่สัมประสิทธิ์ไม่เป็นเมทริกซ์จัตุรัสด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด ระบบสมการเชิงเส้นสามารถแก้ด้วยวิธีการแยกสัมประสิทธิ์ของเมทริกซ์ตามกระบวนการ Gram-Schmidt [68] และการแยกสัมประสิทธิ์นี้ทำให้ได้เมทริกซ์ถ่วงน้ำหนัก (Matrix of weights) สำหรับแต่ละเซลล์ ดังนั้นสำหรับวิธีการใช้จุดศูนย์กลางของเซลล์นี้ทำให้มีตัวถ่วงน้ำหนักน้อยสุด (Least square weight) จำนวน 3 ตัวคือ W_0^x , W_0^y และ W_0^z ที่ถูกกำหนดสำหรับแต่ละผิวหน้าของเซลล์ c_0 ในการคำนวณเกรเดียนต์ ดังนั้นเกรเดียนต์ที่จุดศูนย์กลางเซลล์สามารถคำนวณโดยการคูณตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก (Weight factors) กับผลต่างของเวกเตอร์ $\Delta\phi = \phi_{c_i} - \phi_{c_0}$ ได้สมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} (\phi_x)_{c_0} &= \sum_{i=1}^n W_{i_0}^x (\phi_{c_i} - \phi_{c_0}) \\ (\phi_y)_{c_0} &= \sum_{i=1}^n W_{i_0}^y (\phi_{c_i} - \phi_{c_0}) \\ (\phi_z)_{c_0} &= \sum_{i=1}^n W_{i_0}^z (\phi_{c_i} - \phi_{c_0}) \end{aligned} \quad (3.41)$$

ทั้งนี้ การประมาณค่าเกรเดียนต์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดเป็นวิธีที่มีความแม่นยำและลู่เข้าสู่คำตอบได้เร็วกว่าการประมาณค่าเกรเดียนต์ด้วยวิธีอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) อย่างเหมาะสมสำหรับงานประยุกต์แต่ละประเภท มีผลต่อความถูกต้องของลักษณะการไหลและผลเฉลยทางความร้อน เงื่อนไขขอบเขตจะต้องสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของปัญหา ส่วนการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) สำหรับปัญหาแบบคงตัว ไม่มีความซับซ้อนมากเท่ากับเงื่อนไขขอบเขต [69] เป็นเพียงการกำหนดค่าคงที่เริ่มต้นให้กับตัวแปรในขอบเขตของปัญหาเท่านั้น ดังนั้นเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้

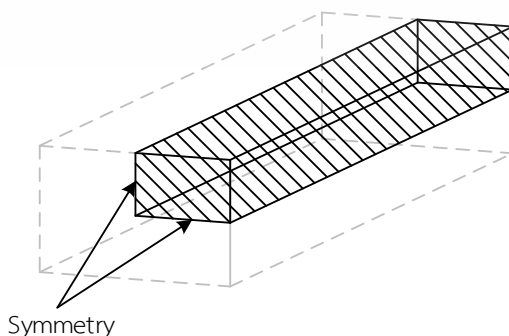
3.5.1 เงื่อนไขขอบเขตผนัง

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตอย่างเหมาะสมสำหรับขอบเขตที่เป็นผนังคือการกำหนดพารามิเตอร์ของความเร็วและความปั่นป่วน เงื่อนไขขอบเขตผนังถูกใช้สำหรับบริเวณที่อยู่ระหว่างของไหลกับผนัง สำหรับการศึกษานี้ เงื่อนไขแบบไม่ลื่นไหลถูกนำมาใช้กับผนังแข็ง ความเร็วของของไหลที่ผนังเท่ากับศูนย์ นอกจากนี้การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตทางความร้อน (Thermal boundary conditions) สำหรับการถ่ายเทความร้อนที่ผนังอาจเป็นสิ่งจำเป็น เช่น เงื่อนไขแบบอุณหภูมิคงที่ พลักซ์ความร้อนคงที่ มีการพาความร้อนหรือการแผ่รังสีความร้อน เป็นต้น

วิธี enhanced wall treatment ที่รวมเอาแบบจำลองการไหล 2 ชั้นกับวิธีฟังก์ชันผนังเสริมเข้าไว้ด้วยกัน ถูกนำมาใช้ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลจากความหนืดระหว่างบริเวณใกล้ผนังกับบริเวณที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์

3.5.2 เงื่อนไขขอบเขตสมมาตร

เงื่อนไขขอบเขตสมมาตร (Symmetry boundary conditions) ถูกใช้เมื่อลักษณะรูปร่างหรือขอบเขตปัญหาที่สนใจหรือลักษณะการไหลและผลเฉลยทางความร้อนมีความสมมาตร เงื่อนไขขอบเขตสมมาตรถูกใช้เพื่อลดขนาดของแบบจำลองที่ใช้คำนวณให้เป็นส่วนย่อยที่มีความสมมาตร สำหรับโปรแกรม ANSYS Fluent จะกำหนดให้ฟลักซ์และปริมาณอื่น ๆ ที่ผ่านเข้าออกขอบเขตสมมาตรมีค่าเป็นศูนย์ ไม่มีฟลักซ์ของการพา (Convection flux) และฟลักซ์ของการแพร่ (Diffusion flux) ผ่านระนาบสมมาตรนี้ [59]

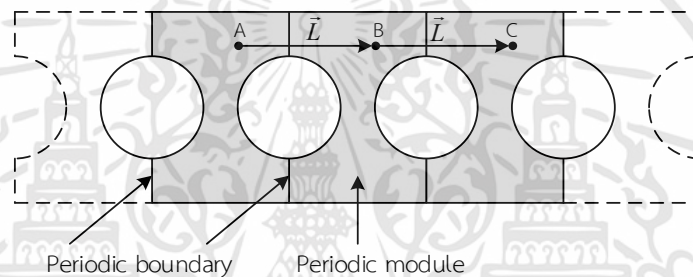


รูปที่ 3.13 การใช้ระนาบสมมาตรเพื่อลดขนาดของแบบจำลองเหลือ 1 ใน 4 ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 เงื่อนไขขอบเขตแบบคาบ

เงื่อนไขขอบเขตแบบคาบ (Periodic boundary conditions) เกิดจากความเหมือนกันแบบคาบของปัญหา เช่น รูปร่างทางกายภาพของปัญหาที่สนใจ รูปแบบการไหล (Flow pattern) และผลเฉลยทางความร้อนที่มีลักษณะซ้ำเป็นคาบอย่างต่อเนื่องตามทิศทางการไหล ช่วยลดระยะเวลาการคำนวณเนื่องจากจำนวนกริดที่ลดลง ลักษณะของการไหลแบบนี้พบในงานประยุกต์หลายอย่าง เช่น การไหลในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็กและการไหลผ่านกลุ่มท่อ (Flow across tube banks) [59] ขอบเขตแบบคาบนั้นมีลักษณะของการไหลที่ไหลผ่านระนาบตรงข้าม 2 ระนาบในแบบจำลองเชิงตัวเลข รูปที่ 3.14 แสดงตัวอย่างรูปร่างเรขาคณิตของเงื่อนไขขอบเขตแบบคาบที่การไหลไหลผ่านแบบจำลองเชิงตัวเลขจากระนาบขอบเขตด้านหนึ่งไปยังขอบเขตของทางออกที่ระนาบตรงข้าม



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างลักษณะรูปร่างเรขาคณิตของขอบเขตแบบคาบ

การไหลแบบคาบมีลักษณะของการไหลที่ซ้ำกันและมีความดันตกคร่อมในช่วงของหน่วยคาบที่มีความยาว L ความเร็วมีการซ้ำตัวเองในพื้นที่การไหลเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} u(\vec{r}) &= u(\vec{r} + \vec{L}) = u(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \\ v(\vec{r}) &= v(\vec{r} + \vec{L}) = v(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \\ w(\vec{r}) &= w(\vec{r} + \vec{L}) = w(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \end{aligned} \quad (3.42)$$

เมื่อ \vec{r} เป็นเวกเตอร์ของตำแหน่งและ \vec{L} เป็นเวกเตอร์ความยาวคาบของขอบเขตที่พิจารณา สำหรับการไหลแบบหนืด (Viscous flow) ค่าของความดันจะไม่ซ้ำเป็นช่วงเหมือนสมการ 3.42 แต่ความดันตกคร่อมระหว่างหน่วยคาบจะซ้ำตัวเองเป็นไปตามสมการ

$$\Delta p = p(\vec{r}) - p(\vec{r} + \vec{L}) = p(\vec{r} + \vec{L}) - p(\vec{r} + 2\vec{L}) \quad (3.43)$$

สำหรับการกำหนดขอบเขตแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนัง สามารถทำให้เกิดการไหลซ้ำเป็นช่วงเชิงความร้อนตามทิศทางของการไหล การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างขอบเขตที่ซ้ำจะมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่และสัมพันธ์กับการเพิ่มความร้อนสุทธิจากขอบเขตของผนัง เมื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเป็นช่วง ในกรณีการไหลที่มีความเร็วต่ำตัวเองในพื้นที่การไหล สนามอุณหภูมิจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับสนามความดันเป็นไปตามสมการ

$$\frac{T(\bar{r} + \bar{L}) - T(\bar{r})}{L} = \frac{T(\bar{r} + 2\bar{L}) - T(\bar{r} + \bar{L})}{L} = \sigma \quad (3.44)$$

เมื่อ σ คือเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถเขียนได้ในพจน์ของการเพิ่มความร้อน Q ดังสมการ

$$\sigma = \frac{Q}{\dot{m}c_p L} = \frac{T_{bulk, outlet} - T_{bulk, inlet}}{L} \quad (3.45)$$

เมื่อ \dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวล อุณหภูมิของไหล (Bulk temperature) สามารถหาได้จากการหาปริพันธ์ตลอดพื้นที่หน้าตัด A ที่เป็นขอบเขตแบบคาบที่ทางเข้า ซึ่งกำหนดโดย

$$T_{bulk} = \frac{\int_A T |\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}|}{\int_A |\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}|} \quad (3.46)$$

สำหรับงานวิจัยนี้ เมื่อรูปร่าง ขนาด และการจัดวางของแผ่นกันและแหวนถูกจัดเรียงซ้ำกันอย่างต่อเนื่อง การไหลจึงถูกพิจารณาให้เป็นการไหลแบบคาบตามที่ได้กล่าวไป เงื่อนไขขอบเขตแบบคาบถูกใช้เป็นขอบเขตของการคำนวณแทนที่เงื่อนไขขอบที่ทางเข้า (Inlet boundary conditions) และเงื่อนไขขอบที่ทางออก (Outlet boundary conditions) ทำให้ประหยัดเวลาและทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณเป็นอย่างมาก

3.6 ขั้นตอนการแก้ปัญหา

สำหรับการศึกษาในส่วนของการจำลองเชิงตัวเลข โปรแกรม ANSYS Workbench ถูกใช้เพื่อทดสอบการคำนวณเชิงตัวเลขของผลกระทบจากแผ่นกันในท่อสี่เหลี่ยมและแหวนในท่อกลมต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหล ปัญหาที่สนใจและสมมุติฐานถูกกำหนดขึ้นก่อนในขั้นตอนแรก ต่อจากนั้นเป็นการสร้างขอบเขตของการคำนวณด้วยโปรแกรมประยุกต์ DesignModeler โปรแกรม CATIA ถูกใช้สร้างแบบจำลองในส่วนที่เป็นแหวน ถัดไปเป็นการสร้างกริดด้วยโปรแกรมประยุกต์ Mesh ที่อยู่ในโปรแกรม ANSYS Workbench แบบจำลองความปั่นป่วนและระเบียบวิธีการคำนวณถูกกำหนดโดยการใช้โปรแกรมประยุกต์ FLUENT ที่อยู่ในโปรแกรม ANSYS Workbench เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขขอบเขตของการไหลและเงื่อนไขขอบเขตทางความร้อน เกณฑ์ของการลู่ออกเข้าสู่ค่าตอบถูกกำหนดในขั้นตอนนี้ด้วยเช่นเดียวกัน หลังจากนั้นเป็นการคำนวณ ท้ายที่สุด ผลเฉลยเชิงตัวเลขถูกตรวจสอบและอภิปราย นอกจากนี้ยังแสดงภาพพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนด้วยโครงสร้างการไหล

3.7 ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการประเมินสมรรถนะเชิงความร้อน

ปัจจัยที่สำคัญต่อการวิเคราะห์การไหล การถ่ายเทความร้อนและการประเมินสมรรถนะของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อ ประกอบไปด้วยเลขเรย์โนลด์ ค่าตัวประกอบเสียดทาน ค่าเลขนัสเซลท์ และตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน

เลขเรย์โนลด์กำหนดโดยอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยและแรงหนืด มีสมการคือ [70]

$$Re = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad (3.47)$$

โดยที่ ρ , μ , U_m และ D คือ ความหนาแน่นของของไหล ความหนืดพลวัต ความเร็วเฉลี่ย และเส้นผ่าศูนย์กลางท่อกลม ตามลำดับ ในกรณีของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส D ถูกกำหนดให้เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก ซึ่งกำหนดโดย $D_h = H$ เมื่อ H คือความกว้างของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส ส่วนกรณีของท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า $D_h = 2WH / (W + H)$ เมื่อ W และ H คือความกว้างและความสูงของท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตามลำดับ

ค่าตัวประกอบเสียดทานเป็นความดันตกคร่อมไร้หน่วยสำหรับการไหลภายในที่มีขอบเขตแบบคาบ ถูกกำหนดจากการประเมินค่าความดันตกคร่อม (ΔP) ตลอดความยาวช่วงทดสอบหรือความยาวของหน่วยคาบ (L) ค่าตัวประกอบเสียดทานกำหนดโดย [70]

$$f = \frac{(\Delta P / L) D}{(\rho U_m^2 / 2)} \quad (3.48)$$

ค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยกำหนดโดย

$$Nu = \frac{1}{A} \int Nu_x dA \quad (3.49)$$

เมื่อค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะจุด $Nu_x = h_x D / k$ โดยที่ h_x เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดและ k คือค่าการนำความร้อนของของไหล

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย h หาได้จาก

$$h = \frac{Q_{conv}}{A(T_w - T_b)} \quad (3.50)$$

โดยที่ Q_{conv} คืออัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา T_b และ T_w คืออุณหภูมิของของไหลและผนัง ตามลำดับ

สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนใน 3 มิติที่สภาวะคงตัว อัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลทดสอบเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ดังสมการ

$$Q_{air} = Q_{conv} \quad (3.51)$$

โดยที่ $Q_{air} = \dot{m}C_{p,air}(T_{outlet} - T_{inlet}) = VI$ ดังนั้น สมการค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยในสมการที่ 3.50 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$h = \frac{\dot{m}C_{p,air}(T_{outlet} - T_{inlet})}{A(T_w - T_b)} \quad (3.52)$$

โดยที่ ค่าเลขนัสเซลต์เฉลี่ยเป็นไปตามสมการ $Nu = hD / k$

ในการเปรียบเทียบปัจจัยที่มีผลต่อการไหลในท่อที่ใส่แผ่นกั้นหรือแหวนกับปัจจัยสำคัญของการไหลในท่อกลมผิวเรียบที่ถูกใช้เป็นตัวอ้างอิง จึงมีการกำหนดพารามิเตอร์ใหม่ขึ้นคือ อัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานและอัตราส่วนค่าเลขนัสเซลต์ อัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานถูกกำหนดเป็น f/f_0 อัตราส่วนค่าเลขนัสเซลต์กำหนดโดย Nu/Nu_0 โดยที่ f และ Nu เป็นค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าเลขนัสเซลต์ของท่อที่ใส่แผ่นกั้นหรือแหวน ส่วน f_0 และ Nu_0 นั้นกำหนดให้เป็นค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าเลขนัสเซลต์ของท่อกลมผิวเรียบ

เกณฑ์ในการประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อที่ใส่แผ่นกั้นหรือแหวนคือตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน ที่ถูกกำหนดจากอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อที่ใส่แผ่นกั้นหรือแหวน (h) เทียบกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อกลมผิวเรียบ (h_0) ที่กำลังปั๊ม (Pumping power) เท่ากัน ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนกำหนดโดย [71]

$$TEF = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \bigg|_{pp} = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (3.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 โครงสร้างการไหล

โครงสร้างการไหลแบบคาบสำหรับของไหลที่ไม่อัดตัวสามารถอธิบายจากกระแสการไหล (Streamlines) ใน 2 มิติ นิยามของกระแสการไหล พื้นผิวของกระแสการไหล (Stream surface) และ แกนกระแสวน (Vortex core) ได้ถูกสรุปไว้ดังต่อไปนี้ [72]

- กระแสการไหลเป็นเครื่องมือในการแสดงภาพของสนามเวกเตอร์ ซึ่งเส้นกระแสเหล่านี้สัมพันธ์กับเวกเตอร์ความเร็วในสนามเวกเตอร์ การฉายกระแสการไหลไปยังฉากหรือระนาบมีประโยชน์อย่างมาก การวาดกระแสการไหลจะถูกทำโดยการใช้เวกเตอร์ของความเค้นเฉือนที่ผนังและอื่น ๆ ที่สอดคล้องกับเส้นกระแสการไหลที่ผนัง
- พื้นผิวของกระแสเป็นชุดของกระแสการไหลในสนามการไหล พื้นผิวของกระแสเป็นวิธีการแสดงสนามเวกเตอร์ใน 3 มิติได้อย่างเป็นธรรมชาติ มีประโยชน์อย่างมากในการแสดงภาพการไหล (Flow visualization) โดยพื้นผิวของกระแสการไหลนี้จะสัมพันธ์กับสนามเวกเตอร์ของความเร็ว
- กระแสวนเป็นการไหลที่กระแสการไหลหมุนวนรอบบริเวณศูนย์กลาง

เนื้อหาในบทต่อไปแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือการทดสอบการไหลในท่อสี่เหลี่ยม เนื้อหาส่วนแรกจะเป็นผลการทดสอบการใช้ประโยชน์จากแผ่น TLC ในการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้ง ส่วนที่สองเป็นการศึกษาคำนวณเชิงตัวเลข 3 มิติสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัวที่จัดเรียงต่อเนื่องในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส หลังจากนั้น เนื้อหาในบทที่ 5-8 จะเป็นการแสดงผลการทดสอบเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวนรูปตัววี 3 แบบคือแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ

บทที่ 4

การทดสอบการไหลในท่อสี่เหลี่ยม

เนื้อหาในบทนี้เป็นการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องทางการไหลที่พื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาเชิงทดลองเพื่อศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อนานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้ง โดยมีการติดตั้งแผ่น TLC เพื่อดูการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว ส่วนที่สองเป็นการศึกษาคำนวณเชิงตัวเลข 3 มิติสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัวที่จัดวางอย่างต่อเนื่องในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยศึกษาลักษณะการจัดวางที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน ทำการวิเคราะห์ความดันลดในรูปของตัวประกอบเสียดทาน การถ่ายเทความร้อนในรูปของค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ย และตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน

4.1 การศึกษาเชิงทดลองของแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้งในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

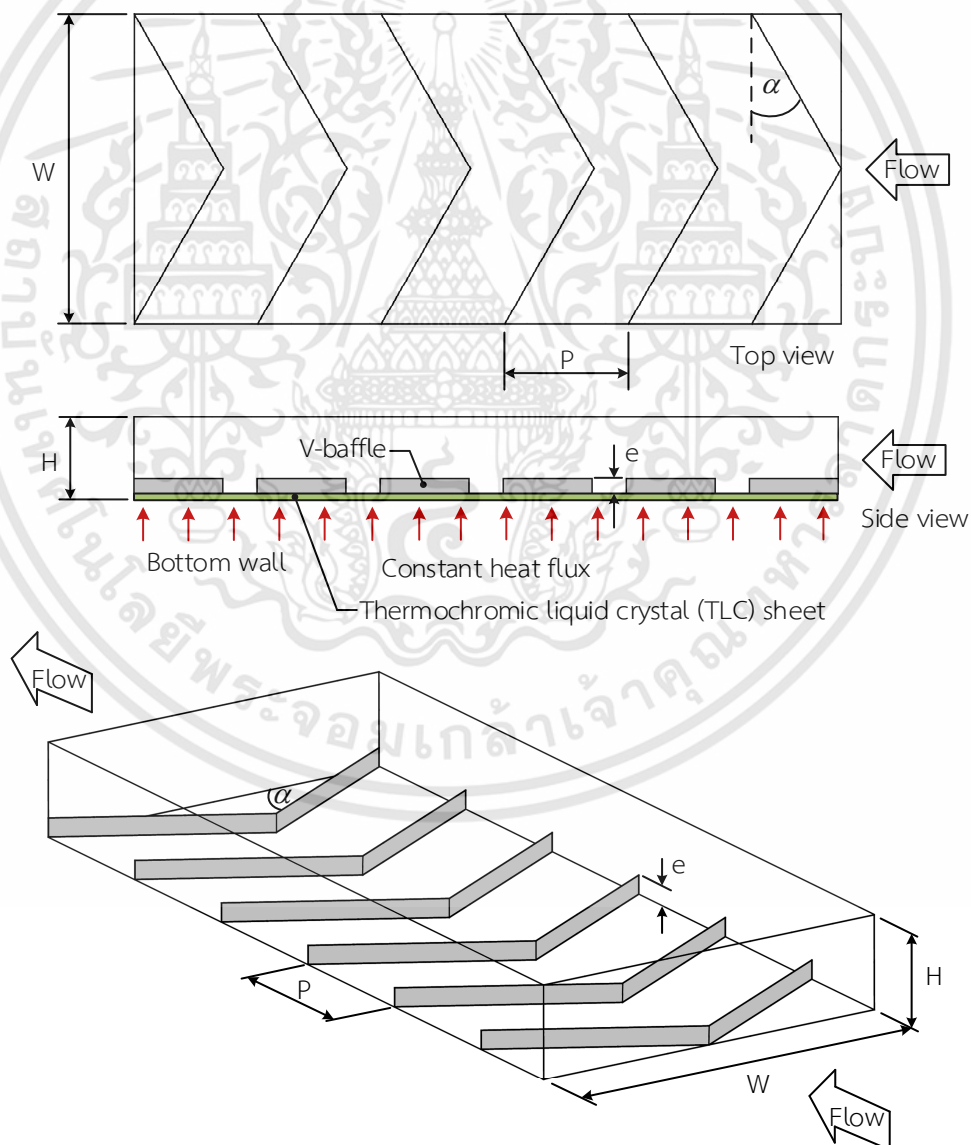
เนื้อหาส่วนนี้กล่าวถึงอุปกรณ์และชุดทดลอง การติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้งในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า วิธีการทดลองและการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างผลการทดลอง หลักการและวิธีการการใช้แผ่น TLC เพื่อศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นให้มีระยะห่างแตกต่างกัน

4.1.1 ชุดทดสอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้ง

ช่องทางการไหลของชุดทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สร้างจากแผ่นอะคริลิกใสขึ้นรูป ขนาดกว้าง 160 mm สูง 40 mm ช่วงทางเข้ามีความยาว 3700 mm (58D) ความยาวของช่วงทดสอบเท่ากับ 300 mm แผ่นกั้นแต่ละอันทำมุมเอียงกับแนวการไหล (Inclination angle, α) แผ่นกั้นถูกติดตั้งแบบชี้ทวนกระแสน้ำ ตัวแปรของรูปร่างแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ประกอบไปด้วย ความสูงของแผ่นกั้น (e) และระยะพิทช์ (Pitch, P) โดยอัตราส่วนระยะพิทช์ (Pitch ratio, PR) เป็นพารามิเตอร์ที่ศึกษาและกำหนดให้ระยะพิทช์สัมพันธ์กับความสูงของแผ่นกั้น ($PR=P/e$) สำหรับรัศมีของแผ่นกั้นรูปโค้ง (r) มีค่าเท่ากับ 184 mm ตัวแปรของรูปร่างสภาวะการไหล และสภาวะทางความร้อนของการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 4.1

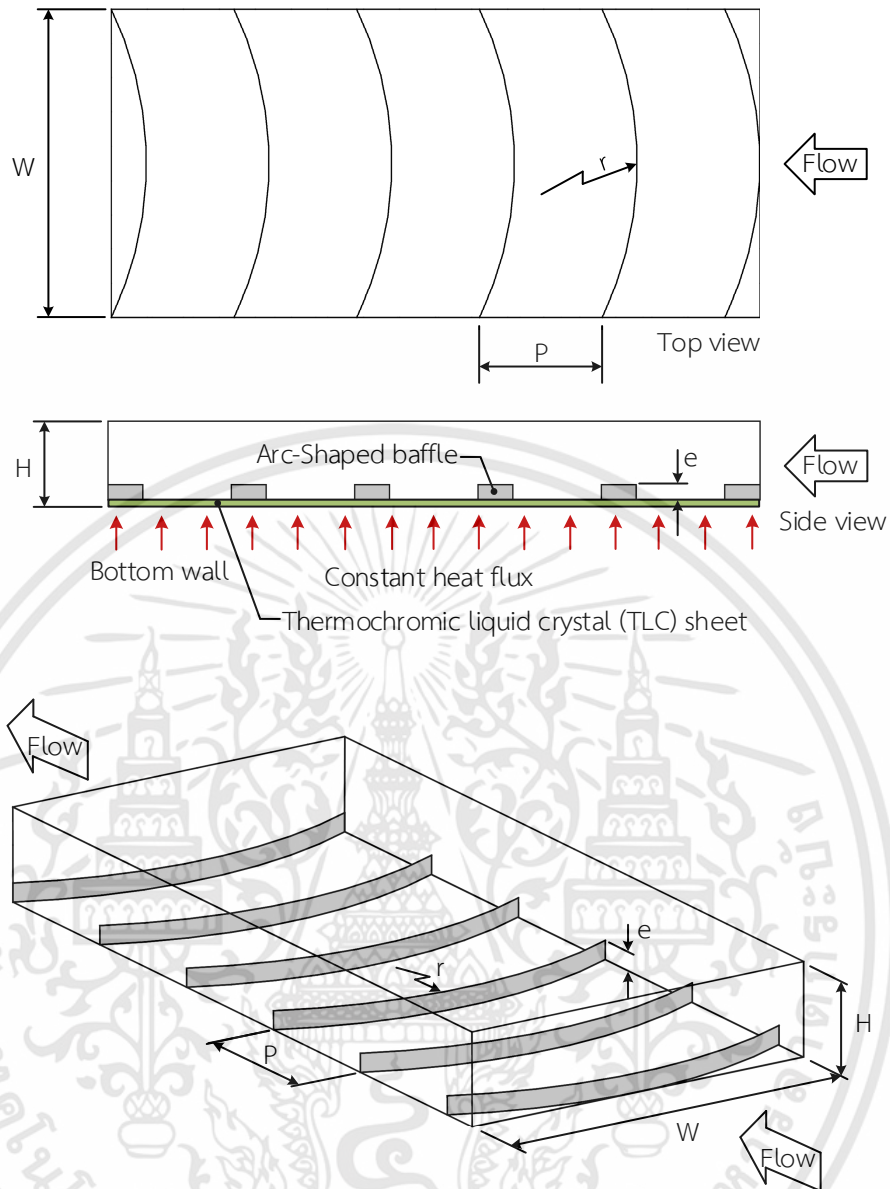
ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ติดตั้งแผ่นกั้นเพื่อสร้างความปั่นป่วนและอุปกรณ์การทดลองต่าง ๆ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.3 อากาศถูกใช้เป็นของไหลทดสอบ ชุดทดลองใช้เครื่องเป่าลมแรงดันสูง (High pressure blower) ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ สำหรับส่งอากาศเข้าระบบไปยังส่วนทดสอบ โดยมีอินเวอร์เตอร์สำหรับปรับความเร็วรอบการทำงานของเครื่องเป่าลมเพื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศตามเลขเรย์โนลด์ที่กำหนด แผ่นออริฟิส (Orifice plate) ถูกติดตั้งที่

บริเวณทางเข้าชุดทดลองระหว่างเครื่องเป่าลมและถังพักลม วัดความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิสและ ส่วนทดสอบด้วยเครื่องมือวัดความดันแบบดิจิตอล ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบค่าความต้านทาน (Resistance temperature detectors, RTDs) PT-100 ถูกติดตั้งเพื่อวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและ ทางออกของส่วนทดสอบ เทอร์โมคัปเปิลถูกติดตั้งเป็นระยะเท่ากัน เพื่อวัดอุณหภูมิที่ผนังด้านล่าง เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ถูกใช้เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิ แผ่นทำความร้อน (Heater plate) เป็นแหล่งสร้างพลังงานความร้อนในการทดลองซึ่งถูกควบคุมด้วยหม้อแปลงแบบปรับค่าแรงดันได้ (Variable-voltage transformers) แผ่น TLC ติดตั้งแนบอยู่บนแผ่นสแตนเลสที่มีความหนา 0.3 mm เพื่อดูการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการทดลอง กล้องดิจิตอลใช้ถ่ายและบันทึกภาพที่ปรากฏ ขึ้นบนแผ่น TLC โปรแกรมวิเคราะห์ถูกนำมาใช้เพื่อแปลงข้อมูลสีเป็นค่าการถ่ายเทความร้อน โดยที่ ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันตกคร่อมที่นำไปใช้เป็นข้อมูลที่สภาวะคงตัว

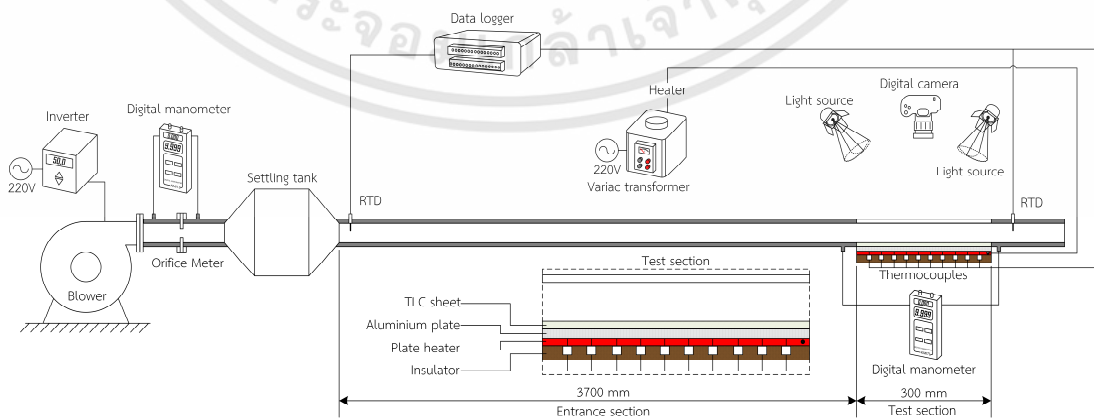


รูปที่ 4.1 ช่องทางการไหลและการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีในส่วนทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ช่องทางการไหลและการติดตั้งแผ่นกั้นรูปโค้งในส่วนทดสอบ



รูปที่ 4.3 แผนผังชุดทดสอบการไหลในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรของรูปร่างและสภาวะการไหลที่ใช้ทดสอบแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้ง

พารามิเตอร์	ค่า
สภาวะของการไหลและการถ่ายเทความร้อน	
ของไหลทดสอบ	อากาศ
เลขเรย์โนลด์ (Re)	6000–22,000
ฟลักซ์ความร้อน (q_s)	600 W/m ²
แผ่นกั้นรูปตัววี/แผ่นกั้นรูปโค้งในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า	
ความสูงช่องขนาน (H)	40 mm
ความกว้างช่องขนาน (W)	160 mm
เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก ($D_h=H$)	64 mm
สัดส่วนความกว้างต่อความสูงของช่องขนาน (Aspect ratio, $AR=W/H$)	4
มุมเอียงของแผ่นกั้นรูปตัววีที่ทำมุมกับแนวการไหล (α)	30°
ความสูงแผ่นกั้น (e)	8 mm
ระยะพิทช์ (P)	32, 48, 64 mm
อัตราส่วนระยะพิทช์ ($PR=P/e$)	4.0, 6.0, 8.0
รัศมีแผ่นกั้นรูปโค้ง (r)	184 mm

4.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

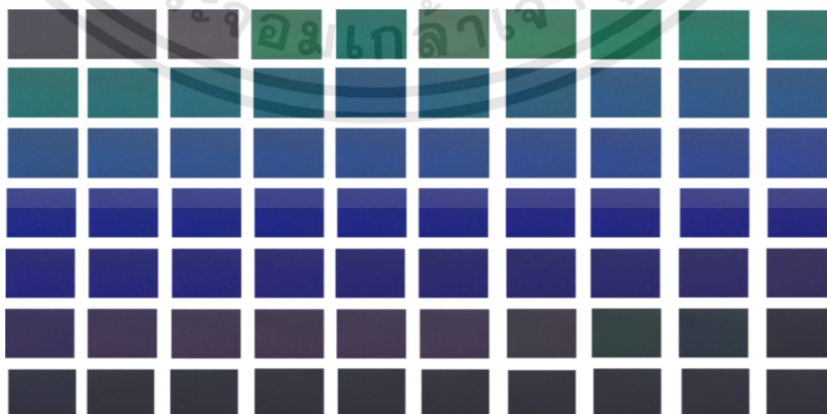
- เปิดเครื่องเป่าลมให้อากาศไหลผ่านชุดทดลองที่ติดแผ่นกั้นที่ $PR=4.0$
- ปรับแรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงเพื่อควบคุมความร้อนของแผ่นทำความร้อน ให้ผิวท่อได้รับความร้อนอย่างคงที่
- บันทึกภาพแผ่น TLC เมื่ออุณหภูมิที่ผนังคงที่ด้วยกล้องดิจิทัลที่ควบคุมสภาวะของแสง บันทึกผลค่าความดันตกคร่อม อุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกชุดทดลอง
- ปรับอัตราการไหลของอากาศให้เลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 6000-22,000
- ติดแผ่นกั้นที่ $PR=6$ และ 8 และทดลองซ้ำจากขั้นตอนที่ 1
- นำภาพถ่ายของแผ่น TLC ที่ได้มาวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลในการติดตั้งแผ่นกั้น
- วิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายแผ่น TLC ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของค่าเลขนัสเซิลท์
- วิเคราะห์ข้อมูลค่าการสูญเสียความดันและการถ่ายเทความร้อน เพื่อหาค่าการเพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน

4.1.3 หลักการทำงานของสาร TLC

สาร TLC เป็นสารประกอบจำพวกออกแกนิคที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลว และของแข็งตามอุณหภูมิ เมื่อส่องสารนี้ด้วยแสงสีขาวในขณะที่เป็นของแข็งสารนี้จะมีลักษณะ ใส ไม่มีสี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุด ๆ หนึ่ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุล ภายในสาร ทำให้แสงที่สะท้อนจากสารนี้เปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์การนี้ จะเกิดซ้ำในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของสาร เมื่อสารนี้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดหนึ่ง คือ T_{rs} (rs: red start) การเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของสาร TLC จะเริ่มเปลี่ยนจากสารที่ใสไม่มีสีเป็นสี เทา หลังจากนั้นจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดง เหลือง และเขียว ตามลำดับ และเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเมื่อ อุณหภูมิถึงอีกจุดหนึ่งคือ T_{bs} (bs: blue start) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีก สีของสารจะเปลี่ยนเป็นสี ใสไม่มีสีอีกครั้ง โดยทั่วไปสาร TLC มีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนสีในช่วง T_{rs} ตั้งแต่ 30-120°C และช่วงความ กว้างอุณหภูมิ ($T_{rs} - T_{bs}$) ตั้งแต่ 0.5-30°C

4.1.4 การสอบเทียบสีกับอุณหภูมิแผ่น TLC

วิธีการสอบเทียบสีกับอุณหภูมิถูกทำบนผนังที่มีการกระจายอุณหภูมิ (Gradient method) โดยการติดแผ่นหรือเคลือบสาร TLC บนผนังที่มีการกระจายอุณหภูมิ เช่น การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิแบบเชิงเส้นและทราบอุณหภูมิแต่ละจุด วิธีนี้สามารถสอบเทียบอุณหภูมิและสีบนแผ่น TLC ได้อย่างต่อเนื่องเพราะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสีบนผนังและของสาร TLC เป็นแบบต่อเนื่อง ทำให้ได้ข้อมูลการสอบเทียบมีความแม่นยำและใช้เวลาในการสอบเทียบน้อย สามารถได้ข้อมูลระหว่างสี กับอุณหภูมิจากการบันทึกภาพเพียงครั้งเดียว ลำดับของการสอบเทียบเริ่มจากการติดแผ่น TLC บน แผ่นอลูมิเนียมที่ติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ ง่ายความร้อนให้กับแผ่นอลูมิเนียมจนอุณหภูมิสูงถึง 45°C แผ่น TLC จะมีสีเทาจนเกือบดำ บันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัลที่ควบคุมสภาวะของแสง รอให้อุณหภูมิลดลง ทีละ 0.2°C และถ่ายรูปรูปที่สภาวะเดิม สีของแผ่น TLC จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ทำซ้ำจน อุณหภูมิเข้าสู่อุณหภูมิกปกติสี



รูปที่ 4.4 สีของแผ่น TLC จากการสอบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 การแปลงสีเป็นอุณหภูมิ

ภาพจากการสอบเทียบสีกับอุณหภูมิของแผ่น TLC ถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าเฉดสีแท้หรือสีบริสุทธิ์ (Hue) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.1 ถึง 4.3 เพื่อแปลงค่าสีจากค่า RGB เป็นค่า Hue ด้วยโปรแกรม LabVIEW

กรณีสีแดงมีค่าสูงสุด

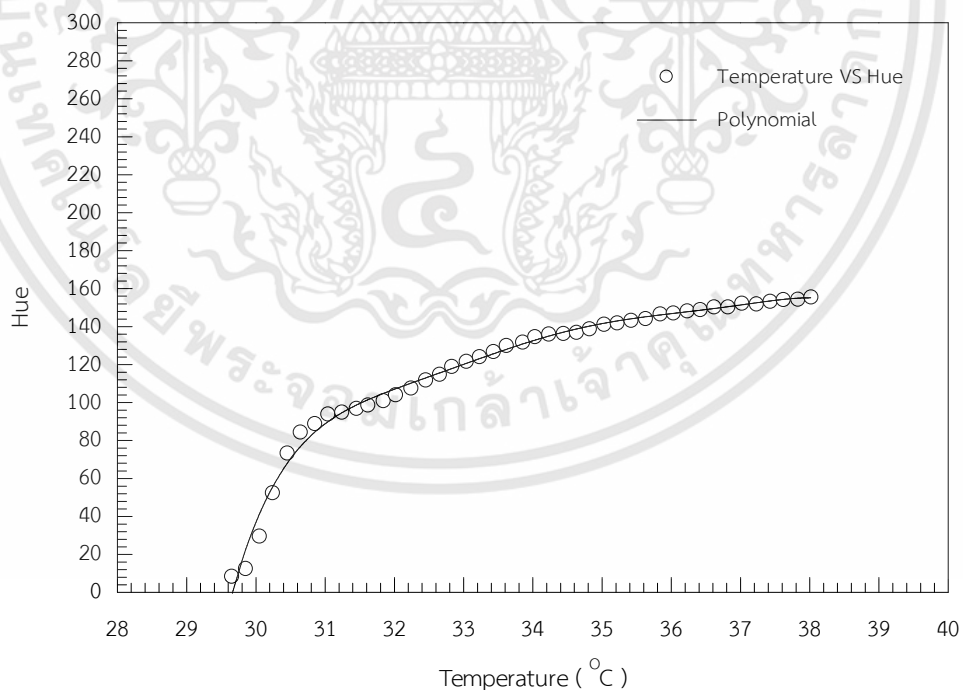
$$\text{Hue} = \left[\frac{\text{Green} - \text{Blue}}{\text{Max} - \text{Min}} \right] \times 60 \quad (4.1)$$

กรณีสีเขียวมีค่าสูงสุด

$$\text{Hue} = \left[\frac{\text{Blue} - \text{red}}{\text{Max} - \text{Min}} \right] \times 60 \quad (4.2)$$

กรณีสีน้ำเงินมีค่าสูงสุด

$$\text{Hue} = \left[\frac{\text{Red} - \text{Green}}{\text{Max} - \text{Min}} \right] \times 60 \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.5 เส้นแนวโน้มของการสอบเทียบระหว่างอุณหภูมิกับค่าเฉดสี Hue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการสอบเทียบแสดงเป็นเส้นแนวโน้มระหว่างค่าเฉดสีเทียบกับอุณหภูมิของแผ่น TLC ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.5 ผลจากการสอบเทียบพบว่าค่าเฉดสีมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแผ่น TLC โดยเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าเฉดสี สามารถใช้ทำนายค่าอุณหภูมิได้เป็นอย่างดี เหมาะสมกับการใช้งานที่อุณหภูมิช่วง 29-38°C

สมการพหุนามของเส้นแนวโน้มระหว่างอุณหภูมิกับค่าสี Hue ที่สามารถนำไปใช้งานได้ เป็นไปตามสมการที่ 4.4

$$T = a_0 + a_1\text{Hue} + a_2\text{Hue}^2 + a_3\text{Hue}^3 + a_4\text{Hue}^4 + a_5\text{Hue}^5 + a_6\text{Hue}^6 \quad (4.4)$$

ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสี Hue

สัมประสิทธิ์	ค่า
a_0	18,865,603.5750360000000000
a_1	3,284,808.8930349100000000
a_2	238,053.5703863270000000
a_3	9,191.06641419970
a_4	199.388809017380000
a_5	2.304371670123750
a_6	-0.011084363125065

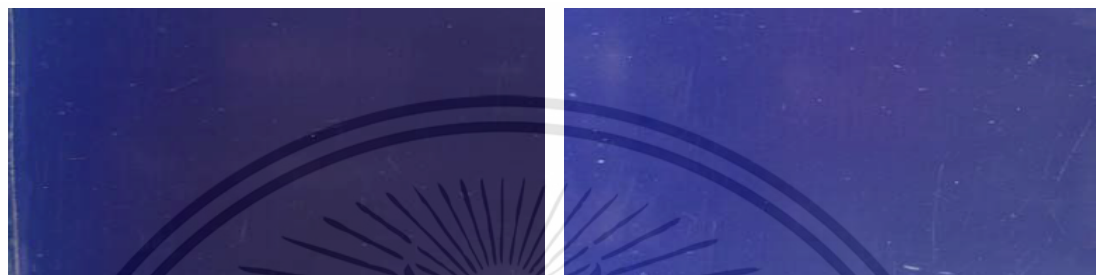
4.1.6 การหาค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการวิเคราะห์ภาพ

การวิเคราะห์ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองนั้นถูกนำเสนอในรูปแบบของการกระจายตัวของเลขนัยสเกลที่อาศัยเทคนิคของการเปลี่ยนแปลงสีตามอุณหภูมิของแผ่น TLC ค่าเลขนัยสเกลที่ในแต่ละจุดของพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนถูกคำนวณด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นจากโปรแกรม LabVIEW โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพมีดังนี้

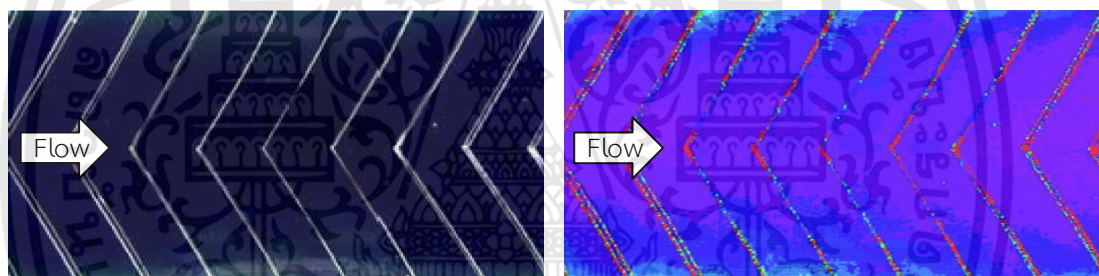
1. กำหนดเงื่อนไขของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ฟลักซ์ความร้อน อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้าและทางออกของชุดทดสอบ ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของชุดทดสอบ
2. นำเข้าภาพถ่ายของแผ่น TLC ที่ต้องการวิเคราะห์เข้าสู่โปรแกรมที่เขียนขึ้น
3. ตัดเลือกภาพเฉพาะบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ โปรแกรมจะทำการแยกองค์ประกอบสี RGB และเปลี่ยนข้อมูลสีเป็นระบบ HSL เพื่อนำไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิในแต่ละจุดของภาพ
4. โปรแกรมทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากข้อมูลอุณหภูมิที่ได้ในขั้นตอนที่ 3

4.1.7 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับแผ่นกั้นรูปตัววีในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

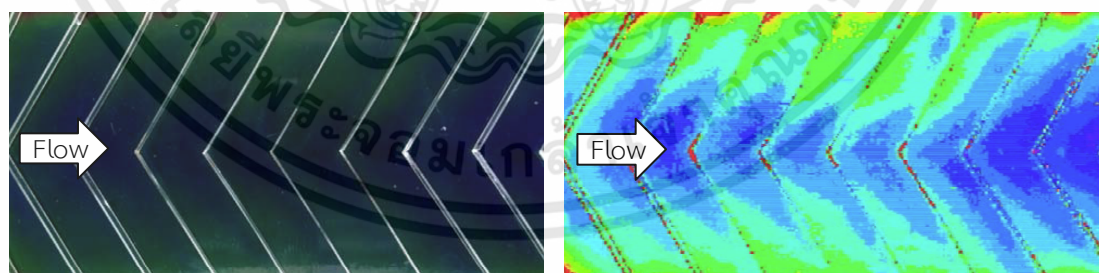
รูปที่ 4.6-4.8 แสดงสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC ที่ $PR=4.0$ และ 8.0 ที่ค่า $Re=6000$ และ $20,000$ สำหรับกรณีท่อผิวเรียบ (รูปที่ 4.6) ที่ $Re=20,000$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่ $Re=6000$ โดยสังเกตจากการความเข้มของสีที่เปลี่ยนแปลงสีจากสีน้ำเงินเข้มไปเป็นน้ำเงินที่อ่อนกว่า (อุณหภูมิของผนังที่ต่ำกว่า การถ่ายเทความร้อนดีกว่า)

(ก) $Re=6000$ (ข) $Re=20,000$

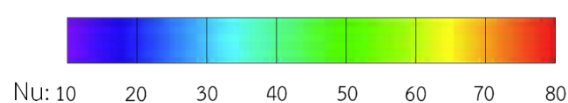
รูปที่ 4.6 สีของอุณหภูมิบนแผ่น TLC ของท่อผิวเรียบ



สีของอุณหภูมิ

ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุด (Nu_x)(ก) $Re=6000$ 

สีของอุณหภูมิ

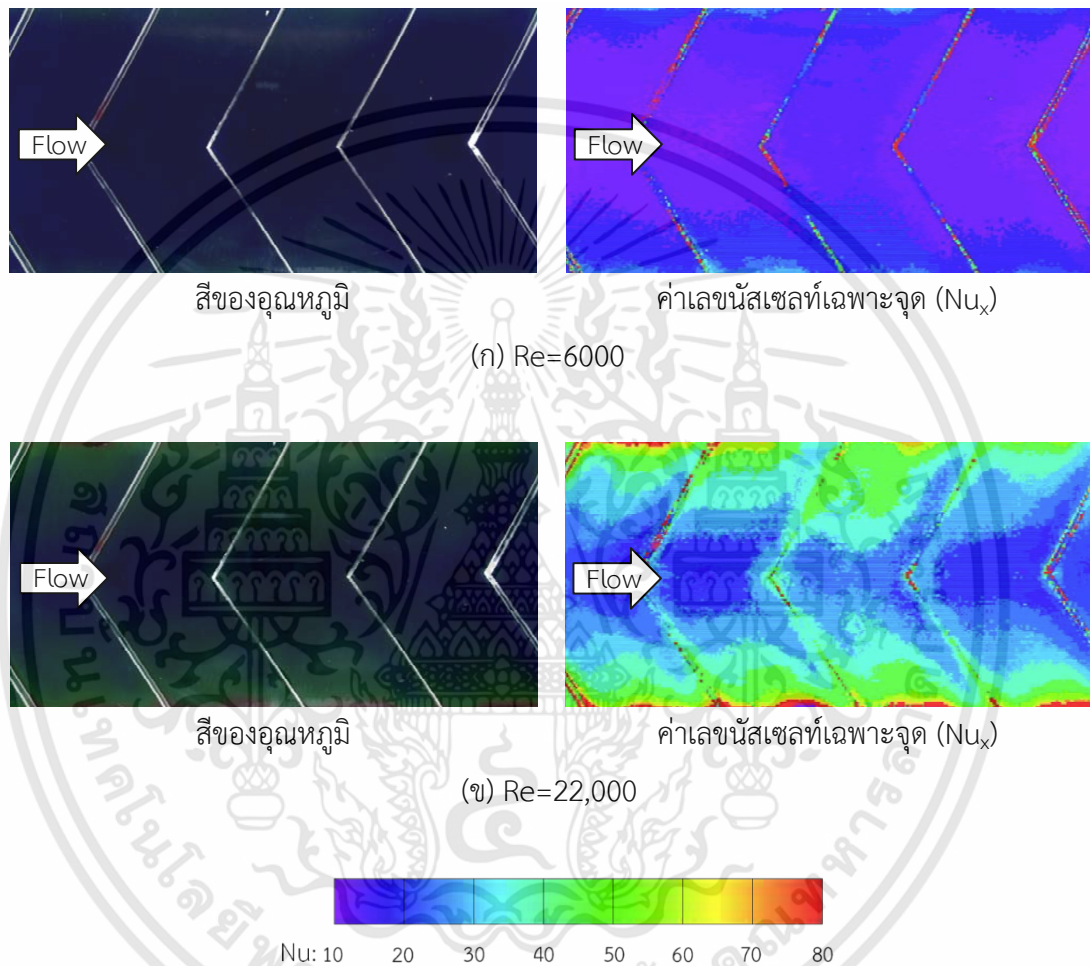
ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุด (Nu_x)(ข) $Re=22,000$ 

Nu: 10 20 30 40 50 60 70 80

รูปที่ 4.7 สีของอุณหภูมิและค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุด (Nu_x) บนแผ่น TLC ที่ $PR=4.0$

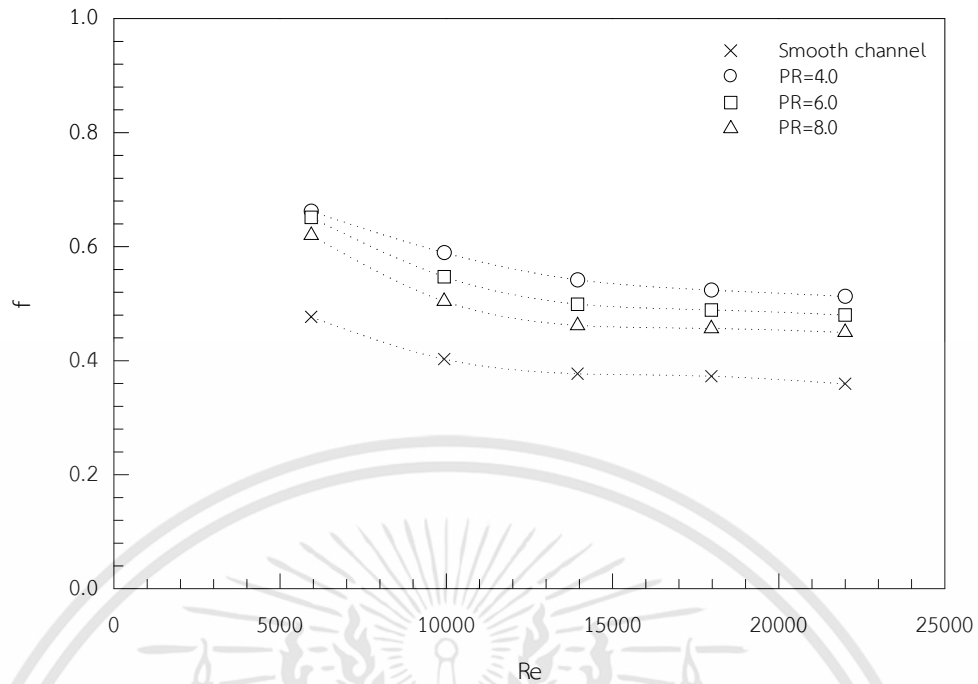
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำกว่าตรงกลางท่อสี่เหลี่ยม ทั้งตำแหน่งก่อนและหลังแผ่นกั้น ขณะที่ในบริเวณถัดไปจากกึ่งกลางท่อไปยังผนังมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นเนื่องจากการหมุนวนไปกระทบกับผนัง เมื่อเพิ่ม Re ทำให้ความปั่นป่วนมีความรุนแรงมากขึ้นและช่วยเหนี่ยวนำให้อากาศบริเวณแกนกลางไปผสมกับอากาศบริเวณผนังมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มค่า PR ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.8 สีของอุณหภูมิและค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะจุด (Nu_x) บนแผ่น TLC ที่ $PR=8.0$

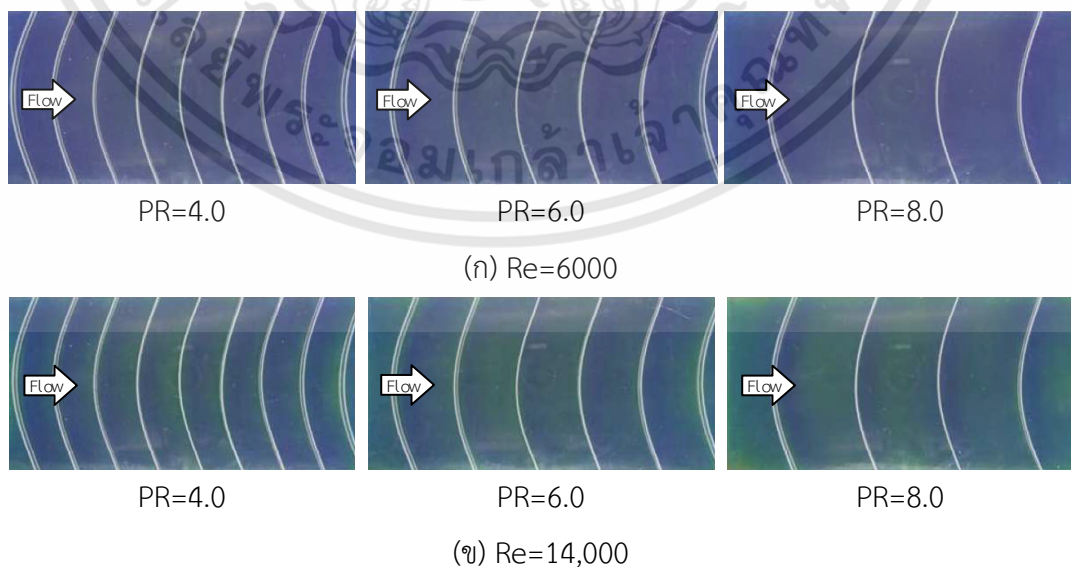
สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า f เมื่อเปลี่ยนค่า Re นั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 4.9 ซึ่งจะเห็นว่าค่า f มีค่าสูงที่ Re ต่ำ ๆ หลังจากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ค่า Re หนึ่ง ก่อนที่จะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ ที่ Re สูงขึ้น เป็นที่แน่นอนว่าค่า f จากการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววียอมให้ค่าที่สูงกว่ากรณีท่อผิวเรียบ ค่า f สูงสุดเกิดขึ้นที่ PR ต่ำสุดคือ 4.0 และที่ $PR=4.0$ นี้ให้ค่า f ที่สูงกว่าที่ $PR=6.0$ และ 8.0 ประมาณ 6-14% ทั้งนี้ ค่า f ที่ $PR=4.0, 6.0$ และ 8.0 มีค่าเท่ากับ 1.43, 1.34 และ 1.25 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลง f กับ Re

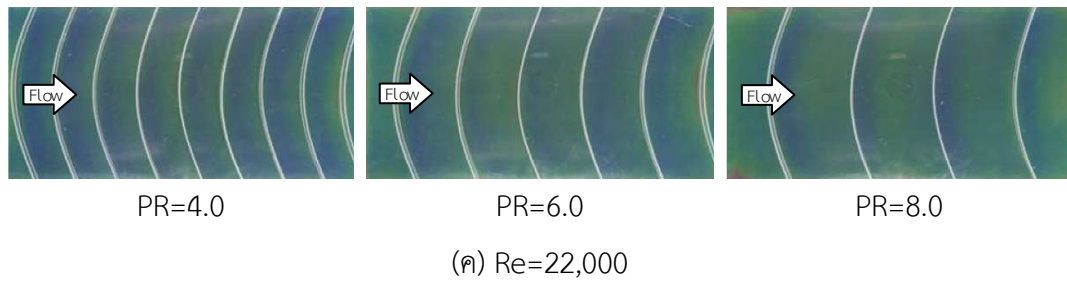
4.1.8 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับแผ่นกั้นรูปโค้งในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การติดตั้งแผ่นกั้นรูปโค้งต่อการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้ กำหนดค่า PR จำนวน 3 ค่า และติดตั้งแผ่นกั้นรูปโค้งที่ผนังด้านล่างเพื่อสร้างความรุนแรงของการหมุนวนภายในช่องทางการไหล รูปที่ 4.10 แสดงสีของอุณหภูมิบนแผ่น TLC ที่ PR ต่างๆ กัน ซึ่งพบว่าที่ค่า Re ต่ำ ๆ ปรากฏสีน้ำเงินเข้มมากกว่าสีเขียว (อุณหภูมิของผนังที่ต่ำกว่า) เมื่อเพิ่มค่า Re สีที่ปรากฏบนพื้นที่จะเปลี่ยนเป็นสีเขียวอยู่ทั่วบริเวณ เนื่องจากมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า

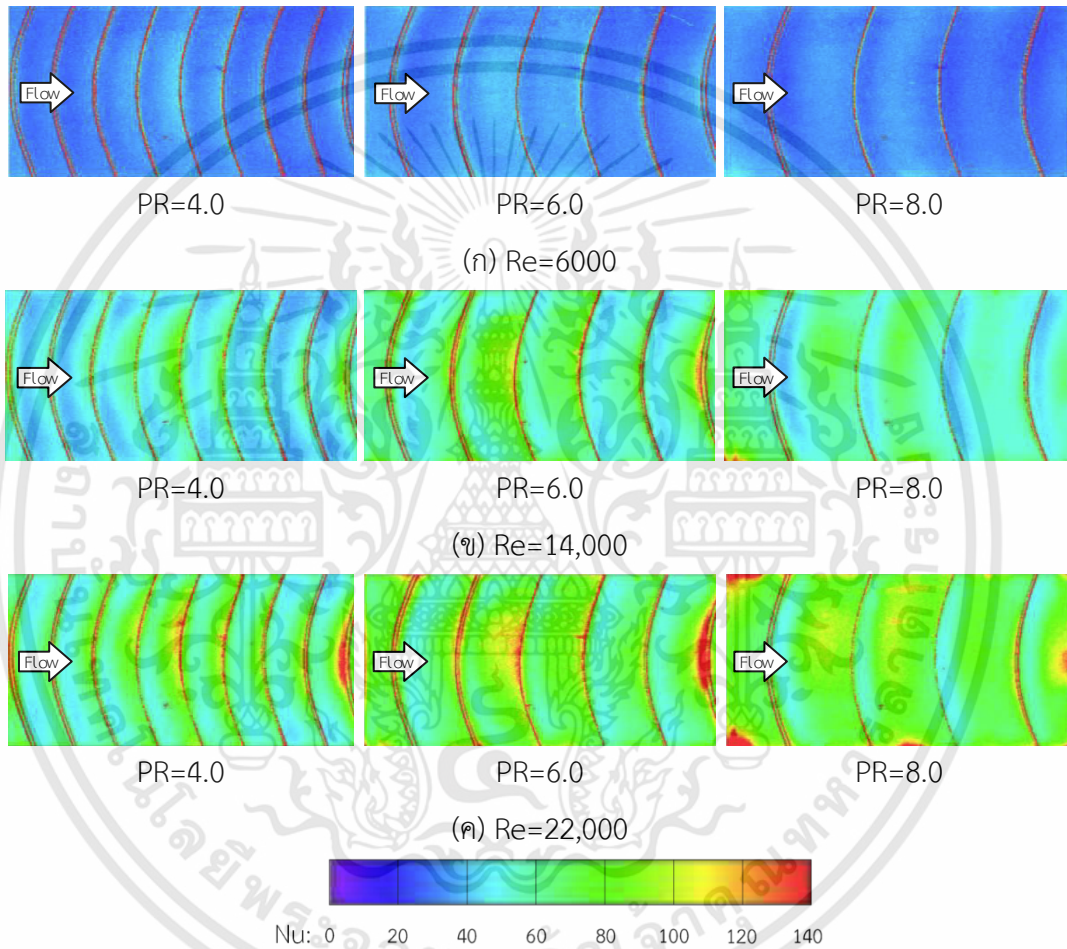


รูปที่ 4.10 สีของอุณหภูมิบนผิว TLC ที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สีของอุณหภูมิบนผิว TLC ที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปโค้ง (ต่อ)



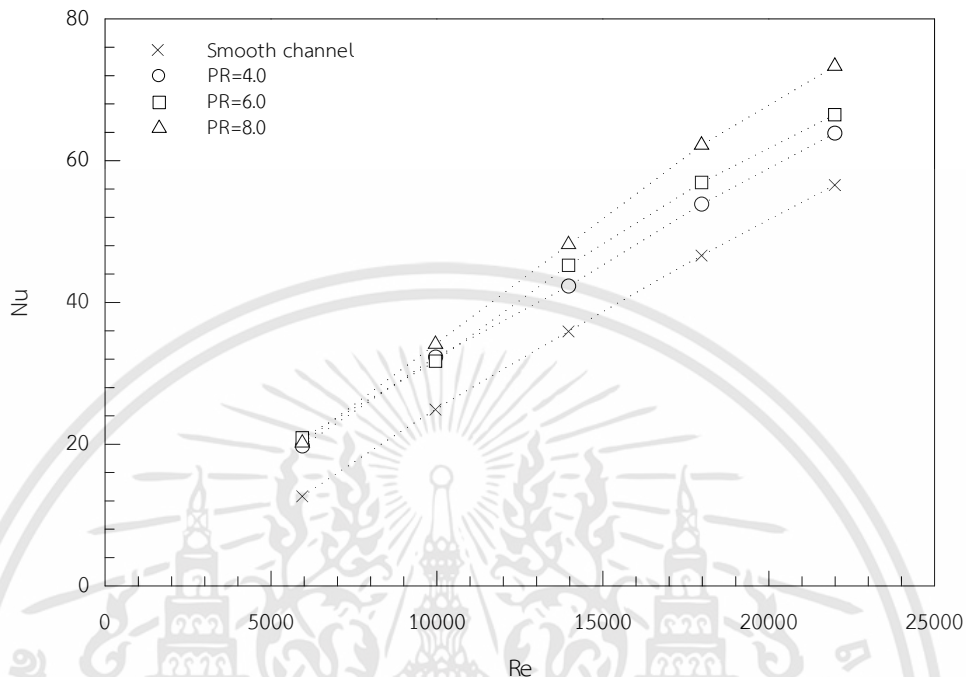
รูปที่ 4.11 ค่าเลขนัสเซิลท์เฉพาะจุด (Nu_x) บนแผ่น TLC ที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปโค้ง

รูปที่ 4.11 แสดงค่า Nu_x บนแผ่น TLC ที่ติดตั้งอยู่กับแผ่นกั้นรูปโค้ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่มีค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำอยู่ที่ด้านหลังของแผ่นกั้น ในขณะที่ด้านหน้าของแผ่นกั้นเป็นบริเวณที่มีค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า

รูปที่ 4.12 แสดงผลจากการติดตั้งแผ่นกั้นรูปโค้งในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่อการถ่ายเทความร้อน จากรูปเป็นการเปรียบเทียบค่า Nu ในช่องทางการไหลเมื่อใช้ค่า PR=4, 6 และ 8 เปรียบเทียบกับกรณีท่อผิวเรียบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งแผ่นกั้นมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในทุกช่วงค่า Re

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่ม Re และ PR โดยมีการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 116%, 120% และ 127% เทียบกับท่อผิวเรียบเมื่อ PR=4, 6 และ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลง Nu กับ Re

4.2 การทดสอบเชิงตัวเลขสำหรับการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัวในท่อจัดรัศ

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นการแสดงขั้นตอนและระเบียบวิธีการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบจากการติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัว เพื่อสร้างความปั่นป่วนที่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อน ค่าตัวประกอบเสียดทานและตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน เนื้อหาส่วนแรกเป็นการแสดงรูปร่างของแผ่นกั้นรูปตัววีและการจัดวางในท่อจัดรัศ ส่วนถัดไปเป็นการกำหนดขอบเขตของการคำนวณ การสร้างกริด (Grid generation) เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่กำหนดจากสมมุติฐานในหัวข้อที่ 3.1 เนื้อหาส่วนท้ายสุดเป็นวิธีการคำนวณและการกำหนดเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่ค่าตอบ โดยการศึกษาเชิงตัวเลขสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อจัดรัศที่มีแผ่นกั้นรูปตัววีนี้ อยู่ภายใต้สมมุติฐานดังต่อไปนี้

- การไหลและการถ่ายเทความร้อนใน 3 มิติที่สภาวะคงตัว
- การไหลเป็นแบบปั่นป่วนและไม่มีการอัดตัว
- เป็นการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่พัฒนาอย่างสมบูรณ์
- ไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของไหล
- ไม่คิดการกระจายความหนืด
- ไม่มีแหล่งผลิตความร้อนภายในของไหลและไม่คิดการแผ่รังสี
- คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลมีค่าคงที่

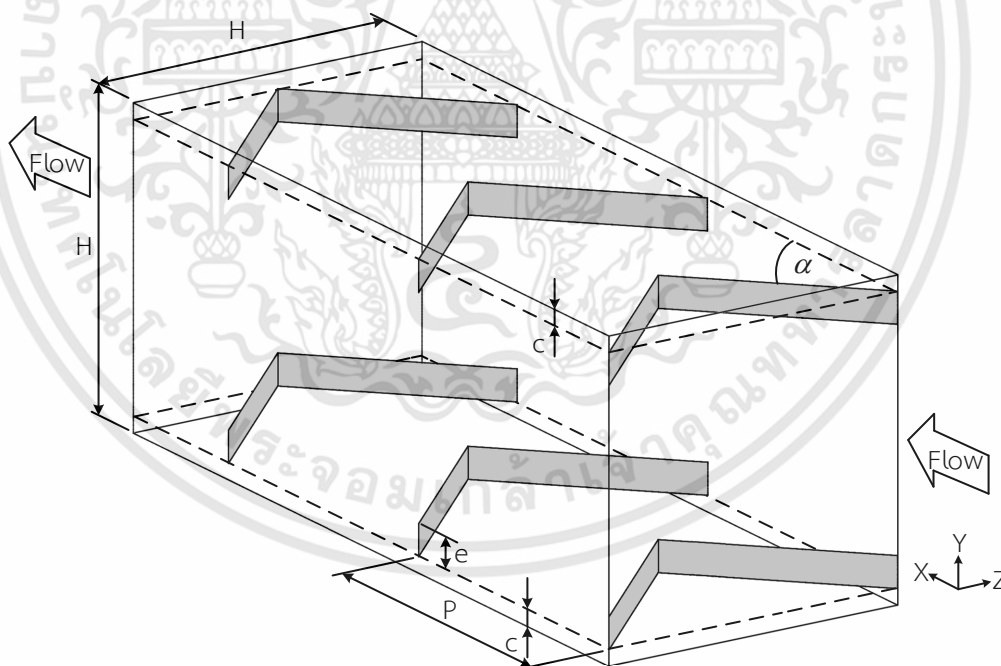
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 รูปร่างของแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัวและการจัดวางสำหรับการจำลองเชิงตัวเลข

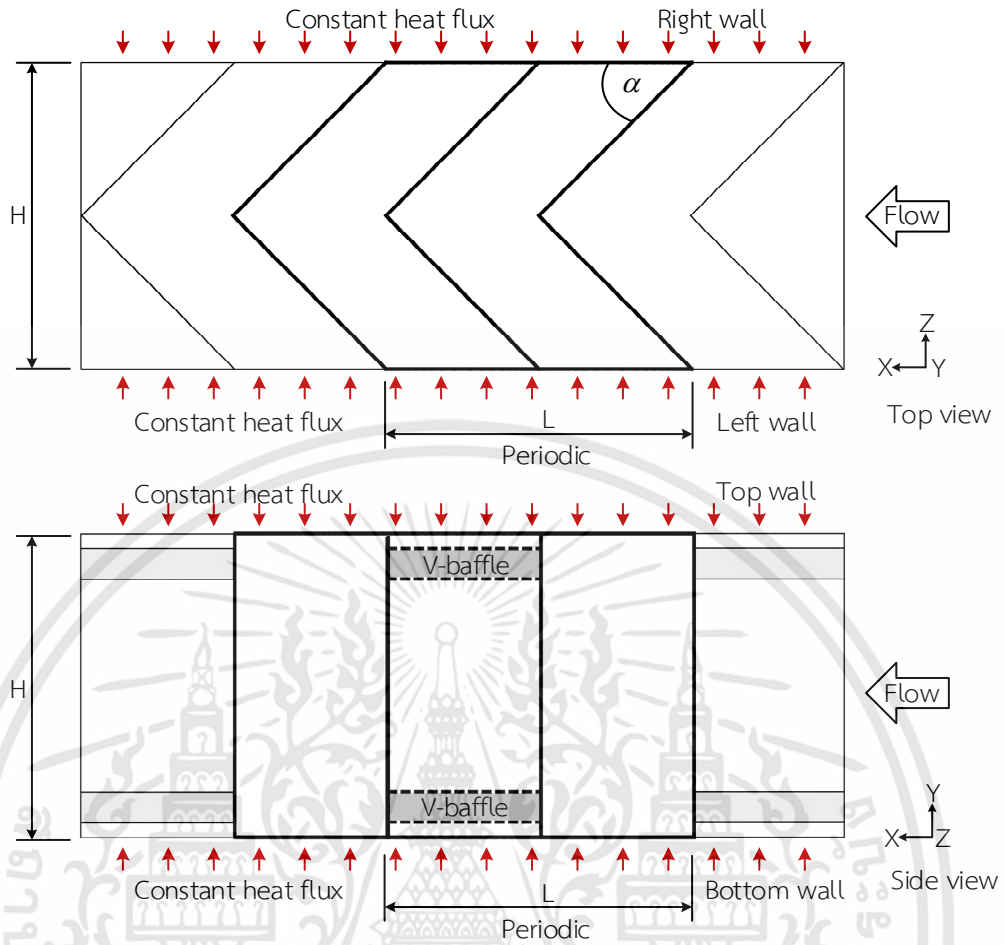
ปัญหาที่สนใจภายใต้การศึกษาเชิงตัวเลขนี้ กำหนดให้เป็นการศึกษาการไหลปั่นป่วนแบบคาบที่การไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์ในท่อจัดรัศมีที่มีลักษณะความร้อนคงที่ที่ผนังทั้ง 4 ด้าน ชุดของแผ่นกั้นรูปตัววีถูกจัดวางอยู่ภายในท่อจัดรัศมี แผ่นกั้นแต่ละอันทำมุมเอียงกับแนวการไหล (α) และถูกจัดวางแบบซ้ำตามกระแสการไหล ตัวแปรของรูปร่างแผ่นกั้นรูปตัววีแสดงอยู่ในรูปที่ 4.13 ประกอบไปด้วย ความสูงของแผ่นกั้น (e) ระยะของช่องว่างระหว่างแผ่นกั้นกับผนังให้ความร้อนหรือเรียกว่าระยะลอยตัว (Detached clearance, c) และระยะพิตช์ (P) โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษากำหนดให้ตัวแปรเหล่านี้สัมพันธ์กับความสูง (H) ของท่อจัดรัศมี ดังนั้นพารามิเตอร์ของรูปร่างที่ศึกษาจึงอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ ได้แก่ อัตราส่วนระยะลอยตัว (CR) อัตราส่วนความสูงแผ่นกั้น (Blockage ratio, BR) และอัตราส่วนระยะพิตช์ (PR)

4.2.2 ขอบเขตการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อน

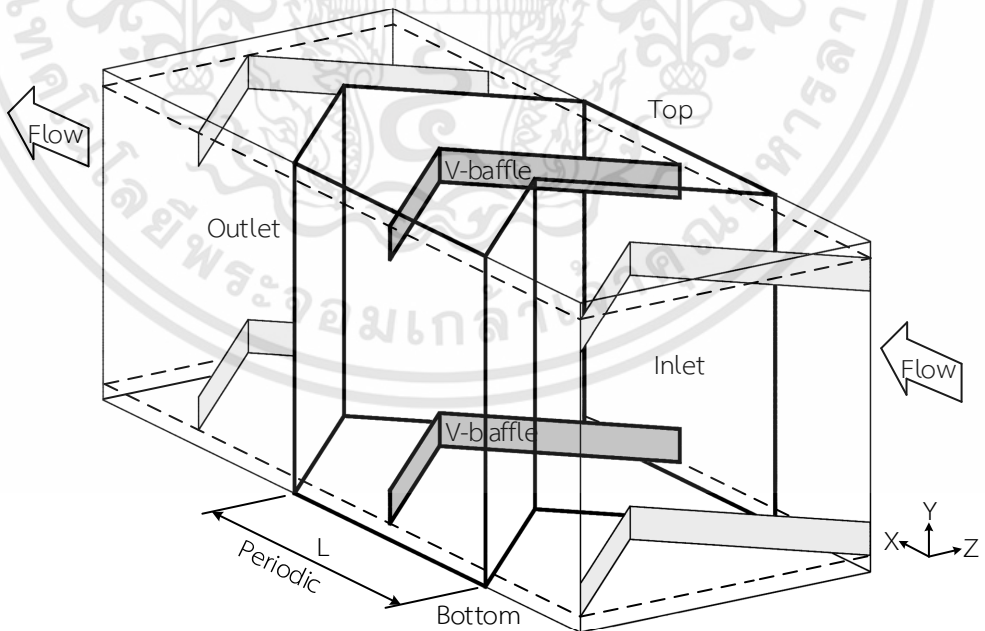
ขอบเขตการคำนวณสำหรับการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีถูกสร้างจากลักษณะรูปร่างของปัญหาที่แสดงในรูปที่ 4.13 ขอบเขตทางเข้าและทางออกถูกกำหนดเป็นขอบเขตแบบคาบ โดยขอบเขตแบบคาบที่แสดงเป็นภาพ 2 และ 3 มิติที่ใช้สำหรับการคำนวณแสดงอยู่ในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 รูปร่างของแผ่นกั้นรูปตัววีและการจัดวางสำหรับการคำนวณ



(ก) แสดงในมุมมอง 2 มิติ



(ข) แสดงในมุมมอง 3 มิติ

รูปที่ 4.14 ขอบเขตการคำนวณสำหรับแผ่นกั้นรูปตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงพารามิเตอร์ของรูปร่างปัญหา สภาวะการไหลและสภาวะทางความร้อนของการทดสอบ แสดงอยู่ในตารางที่ 4.3 เงื่อนไขขอบเขตแบบคาบ ความร้อนที่ผนัง อุณหภูมิที่ทางเข้า แผ่นกั้นรูปตัววี ที่เป็นฉนวน ถูกกำหนดในขอบเขตการคำนวณ สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ เงื่อนไขพลังค์ความร้อนคงที่ ถูกกำหนดให้กับผนังทั้ง 4 ด้านของท่อจตุรัส อากาศไหลเข้าที่ทางเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ คุณสมบัติของอากาศที่ทางเข้าสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขของการทดสอบการไหลในบ้นั้นแสดงอยู่ในตารางที่ 4.4 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขตามเลขเรย์โนลด์ที่กำหนดแสดงอยู่ในตารางที่ 4.5 การคำนวณเพื่อหาค่าตอบจะถูกกระทำด้วยระเบียบวิธีทำซ้ำจนกว่าจะถึงเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่ค่าตอบตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของรูปร่างปัญหาและสภาวะการไหลที่ใช้ทดสอบแผ่นกั้นรูปตัววี

พารามิเตอร์	Values
สภาวะของการไหลและการถ่ายเทความร้อน	
ของไหลทดสอบ	อากาศ
เลขเรย์โนลด์ (Re)	3000–20,000
พลังค์ความร้อน (q_s)	600 W/m ²
ท่อจตุรัสและแผ่นกั้นรูปตัววี	
ความสูง (H)	50 mm
ความกว้าง (W)	50 mm
เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก ($D_h=H$)	50 mm
ความยาวคาบ (L)	เท่ากับระยะพิตช์
ระยะลอยตัว (c)	0, 2.5, 5, 7.5, 10 mm
อัตราส่วนระยะลอยตัว ($CR=c/H$)	0.0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20
ความสูงแผ่นกั้น (e)	5 mm
อัตราส่วนความสูงแผ่นกั้น ($BR=e/H$)	0.1
ระยะพิตช์ (P)	50 mm
อัตราส่วนระยะพิตช์ ($PR=P/H$)	1.0
มุมเอียงของแผ่นกั้นที่ทำมุมกับแนวการไหล (α)	45°

ตารางที่ 4.4 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข [73]

พารามิเตอร์	ค่าคงที่
คุณสมบัติของแผ่นกั้นรูปตัววี (300K)	
วัสดุ	อลูมิเนียม
ความหนาแน่น (ρ)	2702 kg/m ³
ความจุความร้อนจำเพาะ (C_p)	903 J/kg.K
ค่าการนำความร้อน (k)	237 W/m ² .K
คุณสมบัติของอากาศ (300K, 1atm)	
ความหนาแน่น (ρ)	1.1614 kg/m ³
ความจุความร้อนจำเพาะ (C_p)	1007 J/kg.K
ค่าการนำความร้อน (k)	0.0263 W/m ² .K
ค่าความหนืดพลวัต (μ)	1.846x10 ⁻⁵ kg/m.s
ค่าความหนืดจลน์ (ν)	1.589x10 ⁻⁵ m ² /s
เลขพรานด์ (Pr)	0.707
อุณหภูมิทางเข้า (T_{inlet})	300K

ตารางที่ 4.5 อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองเชิงตัวเลขสำหรับทดสอบแผ่นกั้นรูปตัววี

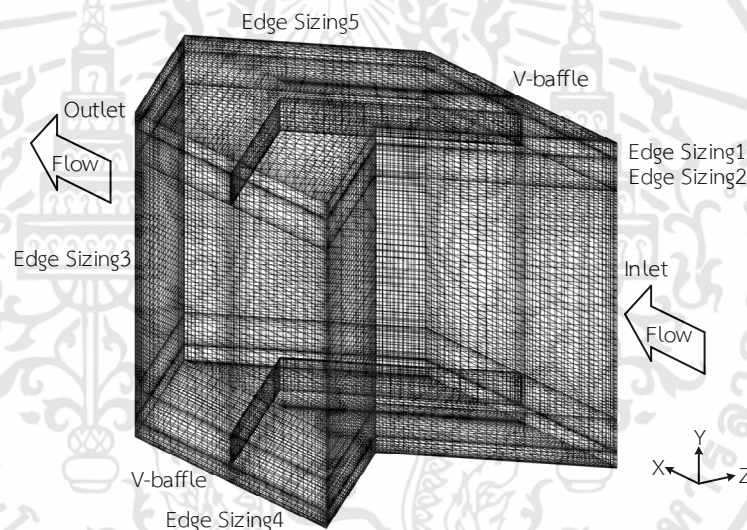
เลขเรย์โนลด์ (Re)	อัตราการไหล (kg/s)
3000	2.769x10 ⁻³
4000	3.692x10 ⁻³
6000	5.538x10 ⁻³
8000	7.384x10 ⁻³
10,000	9.230x10 ⁻³
12,000	11.076 x10 ⁻³
14,000	12.922 x10 ⁻³
20,000	18.460 x10 ⁻³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การสร้างกริด

สำหรับการคำนวณการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววี กริดถูกสร้างด้วยโปรแกรมประยุกต์ Mesh ที่อยู่ในโปรแกรม ANSYS Workbench ขอบเขตการคำนวณกำหนดให้เป็นกริดแบบ quadrilateral-faced hexahedral จากคำสั่งที่อยู่ในโปรแกรมประยุกต์ FLUENT การตรวจสอบจำนวนกริดที่เพียงพอสำหรับใช้ทดสอบแผ่นกั้นรูปตัววี ถูกทำที่ $PR=1.0$, $BR=0.1$ และ $Re=3000$ ด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ เมื่อเพิ่มจำนวนกริดจาก 320,000 ถึง 500,000 ค่า f และ Nu เปลี่ยนแปลงต่ำกว่า 0.1% ดังนั้นจำนวนกริดที่เพียงพอสำหรับการทดสอบแผ่นกั้นรูปตัววีนี้คือ 320,000 กริด

รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างกริดที่ใช้สำหรับการคำนวณการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววี กริดที่มีความละเอียดถูกสร้างในบริเวณใกล้กับผนังรับความร้อนกับแผ่นกั้น โครงสร้างกริดจึงมีความหนาแน่นสูงที่บริเวณนี้ ส่วนบริเวณการไหลที่ห่างไกลออกไปจากผนังได้ทำการลดจำนวนกริดให้น้อยลงแต่ยังคงให้ค่าของผลเฉลยที่ไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.15 โครงสร้างกริดที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับท่อจัดรัศมีที่ใส่แผ่นกั้นรูปตัววี

4.2.4 เงื่อนไขที่ขอบและเงื่อนไขเริ่มต้น

การจำลองใช้เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นดังต่อไปนี้

○ ใช้การจำลองภายใต้เงื่อนไขขอบเขตแบบคาบที่ทางเข้าและทางออกของแต่ละหน่วยของคาบ (Periodic module)

- ผนังอยู่กับที่ (Stationary wall) ไม่มีการลื่นไถล (No-slip) ของอากาศที่ผนัง
- ฟลักซ์ความร้อนที่ผนังกำหนดให้คงที่ (Constant surface heat flux)
- แผ่นกั้นรูปตัววีถูกกำหนดให้เป็นฉนวน
- อุณหภูมิอากาศทางเข้า (Upstream bulk temperature) กำหนดเป็น 300K
- ของไหลเป็นอากาศที่มีคุณสมบัติคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ระเบียบวิธีการคำนวณและเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบ

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method/scheme) ที่ใช้ สำหรับการศึกษานี้แสดงอยู่ในตารางที่ 4.6 โดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้คำนวณคือแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ ร่วมกับเงื่อนไขขอบที่ผนังแบบ enhanced wall treatment

ตารางที่ 4.6 ระเบียบวิธีที่ใช้ในการคำนวณวิธีเชิงตัวเลข

พารามิเตอร์	ระเบียบวิธี, ค่าคงที่
แบบจำลองความปั่นป่วน	
Viscous Model	RNG $k-\epsilon$
Near-Wall Treatment	Enhanced Wall Treatment
Model Constants	
C_μ , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, Wall Prandtl Number	0.0845, 1.42, 1.68, 0.85
ระเบียบวิธี	
Solver type	Pressure-based
Pressure-velocity coupling	SIMPLE
Gradient	Least squares cell based
Pressure	Second Order
Momentum	QUICK
Turbulent Kinetic Energy (k)	QUICK
Turbulent Dissipation Rate (ϵ)	QUICK
Energy	QUICK

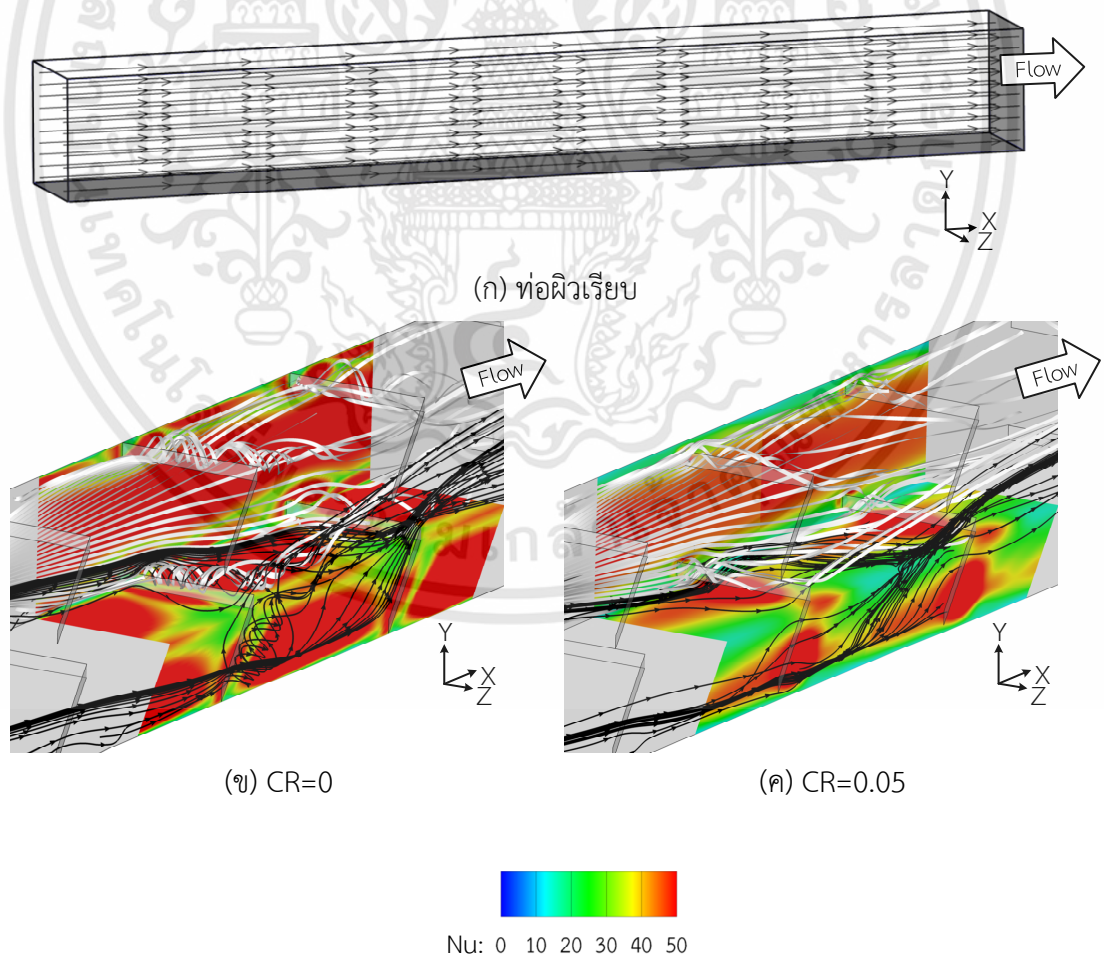
เศษตกค้าง (Residuals) ของสมการพีชคณิตเป็นตัวระบุการลู่เข้าสู่คำตอบของกระบวนการทำซ้ำและมีการเปลี่ยนแปลงของสมการในแต่ละขั้นของการทำซ้ำ เศษตกค้างจะลดลงจนกระทั่งตัวเลขนัยสำคัญของตัวแปรของการไหลไม่เปลี่ยนแปลง จากหลักการนี้ การจำลองเชิงตัวเลขจะถูกหาคำตอบด้วยวิธีการทำซ้ำจนกว่าการคำนวณจะไปถึงเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบในระดับที่กำหนด ในการศึกษา การคำนวณจะถือว่าลู่เข้าสู่คำตอบเมื่อเศษตกค้างของตัวแปรลดลงต่ำกว่า 1×10^{-5} ยกเว้นสมการพลังงานที่เกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบกำหนดไว้ต่ำกว่า 1×10^{-9} การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของเศษตกค้าง (Monitoring residuals) ของตัวแปรและเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เศษตกค้างของตัวแปรและเกณฑ์ของการเข้าสู่ค่าตอบ

พารามิเตอร์	เกณฑ์ของการเข้าสู่ค่าตอบ
สมการความต่อเนื่อง (Continuity)	10^{-5}
x-velocity	10^{-5}
y-velocity	10^{-5}
z-velocity	10^{-5}
สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k)	10^{-5}
สมการอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (ϵ)	10^{-5}
พลังงาน (Energy)	10^{-9}

4.2.6 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับแผ่นกั้นรูปตัววีในท่อจตุรัส

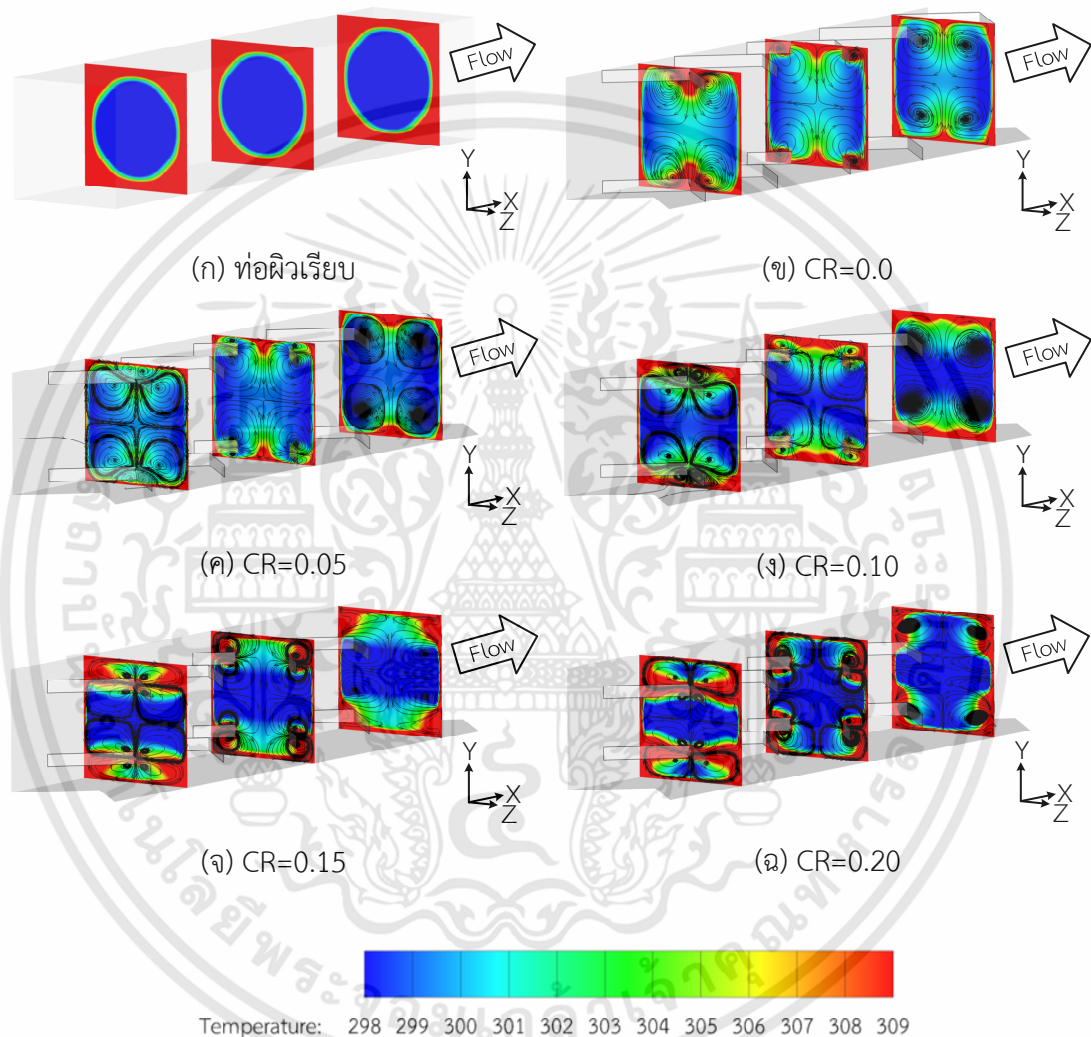
โครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อจตุรัสที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีที่ผนังด้านบนและด้านล่างแสดงอยู่ในรูปที่ 4.16-4.18



รูปที่ 4.16 การไหลแบบวอร์เทคตามยาวและค่าเลขนัสเซลท์เฉพาะจุด (Nu_x) ที่ $Re=3000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.16 แสดงกระแสการไหลและค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะจุดสำหรับท่อจัดรั้วสี่เหลี่ยมเรียบและท่อติดแผ่นกั้นที่ $CR=0.0-0.05$ และ $Re=3000$ สำหรับท่อผิวเรียบ การไหลไม่มีความปั่นป่วนเกิดขึ้น ในขณะที่ท่อที่จัดวางแผ่นกั้นที่ $CR=0$ และ 0.05 มีอากาศที่หมุนวนเป็นเกลียวไหลกระแทกผนังตลอดช่วงทดสอบการไหล อากาศที่หมุนวนเป็นเกลียวมีการเคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นที่ว่างด้านในของแผ่นกั้นและลอยสูงขึ้นที่บริเวณปลายมุมแหลมของแผ่นกั้น

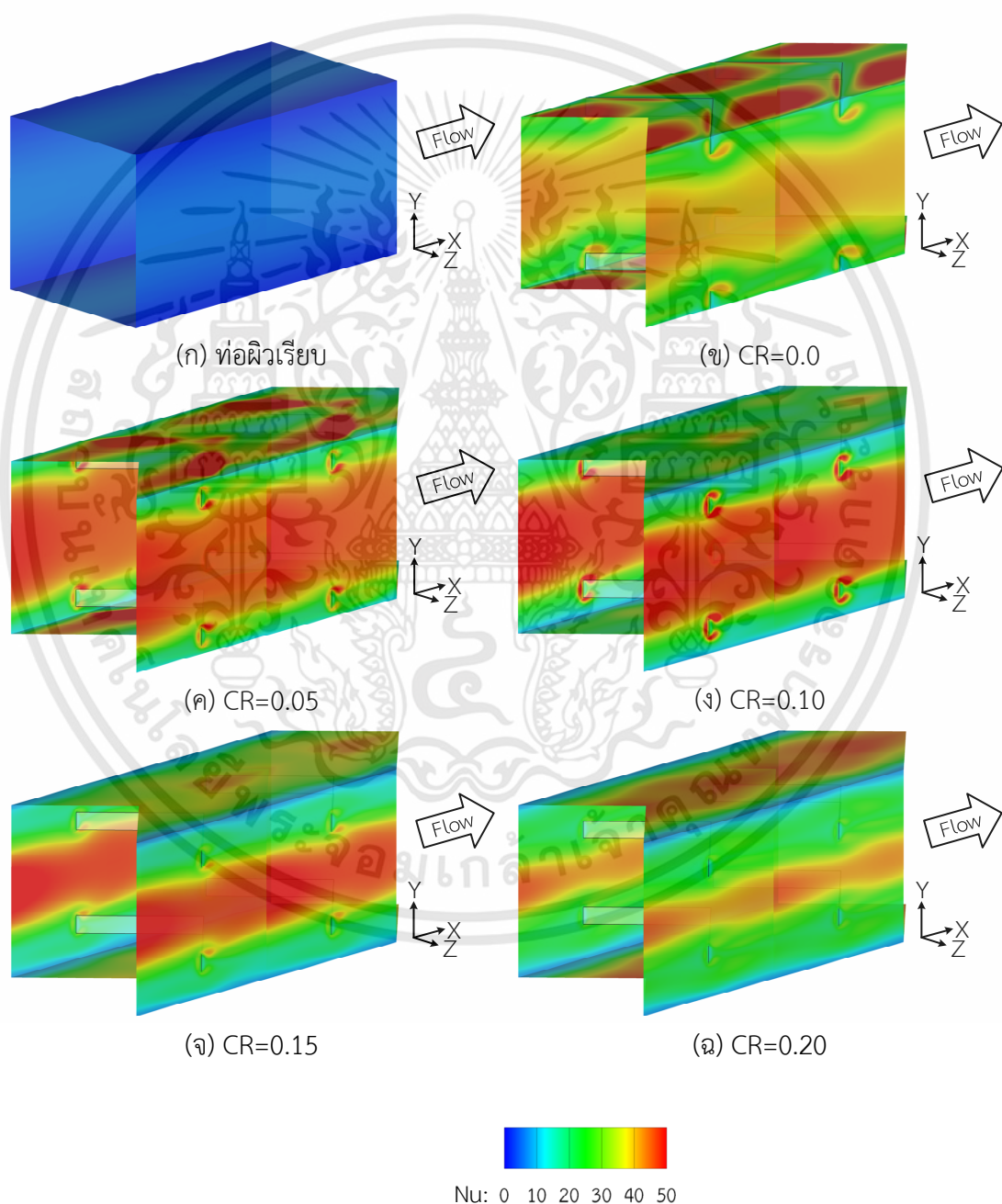


รูปที่ 4.17 โครงสร้างการไหลและอุณหภูมิบนระนาบตัดขวางที่ $Re=3000$

รูปที่ 4.17(ก)-(ฉ) แสดงเส้นกระแสการไหลและอุณหภูมิบนระนาบตัดขวางที่ตำแหน่งมุมตัดกึ่งกลางและปลายของแผ่นกั้นที่ $Re=3000$ ทั้งกรณีท่อผิวเรียบและที่จัดวางแผ่นกั้นรูปตัววีที่ $CR=0.0-0.20$ สำหรับกรณีท่อผิวเรียบ การกระจายอุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในแต่ละระนาบ อุณหภูมิที่บริเวณแกนของการไหลยังคงเป็นอากาศเย็น สำหรับที่ $CR=0.0-0.10$ ของไหลเกิดการแยกออกเป็น 4 ส่วนเมื่อผ่านแผ่นกั้นจะมีการหมุนวนขนาดเล็กอีก 4 ส่วนอยู่ที่มุมตัดและบริเวณตรงกลางแผ่นกั้น การไหลหมุนวนที่เกิดจากแผ่นกั้นเหล่านี้ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

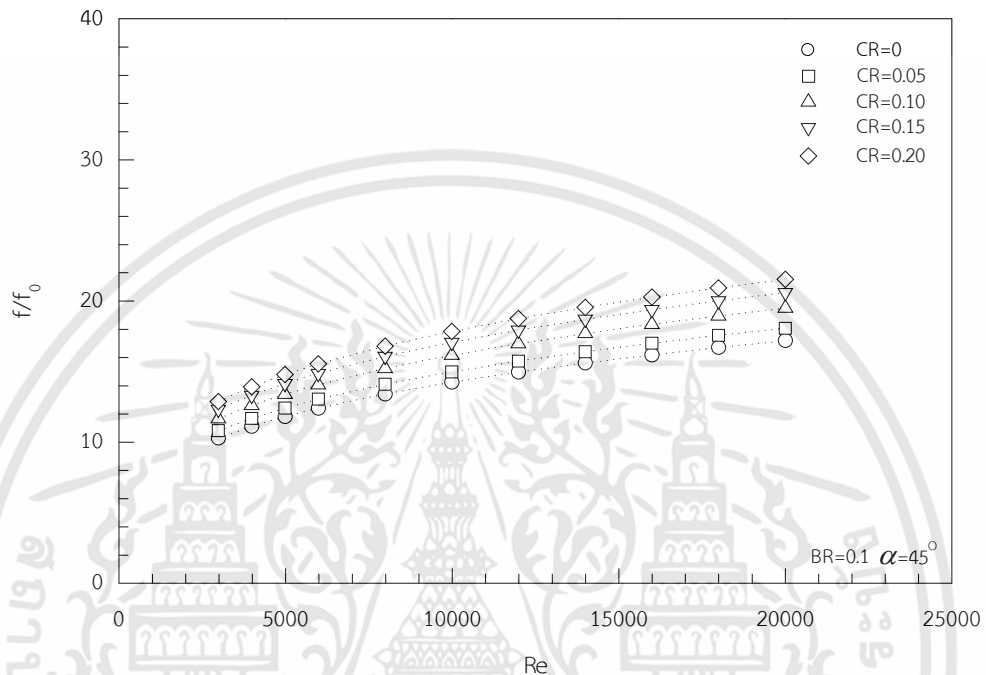
ชัดเจน โดยสังเกตได้จากสนามอุณหภูมิที่อยู่บนระนาบตัดขวางมีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่องทางการไหล อากาศร้อนที่ผนังถูกเหนี่ยวนำไปผสมกับอากาศเย็นที่อยู่บริเวณแกนกลางของการไหล ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการพาความร้อน ส่วนที่ $CR=0.15$ และ 0.20 เกิดการหมุนวนขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 8 ส่วนที่ตำแหน่งปลายและตรงกลางแผ่นกัน การหมุนวนที่อยู่บริเวณผนังด้านบน 2 ส่วนและทางด้านล่างอีก 2 ส่วน มีทิศทางของกระแสการไหลเข้าสู่ผนังและถูกแยกออกจากการหมุนวนอีก 4 ส่วนที่อยู่บริเวณกลางท่อ อากาศร้อนจึงไม่ถูกเหนี่ยวนำไปผสมกับอากาศเย็นบริเวณกลางท่อ ทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นน้อยมาก



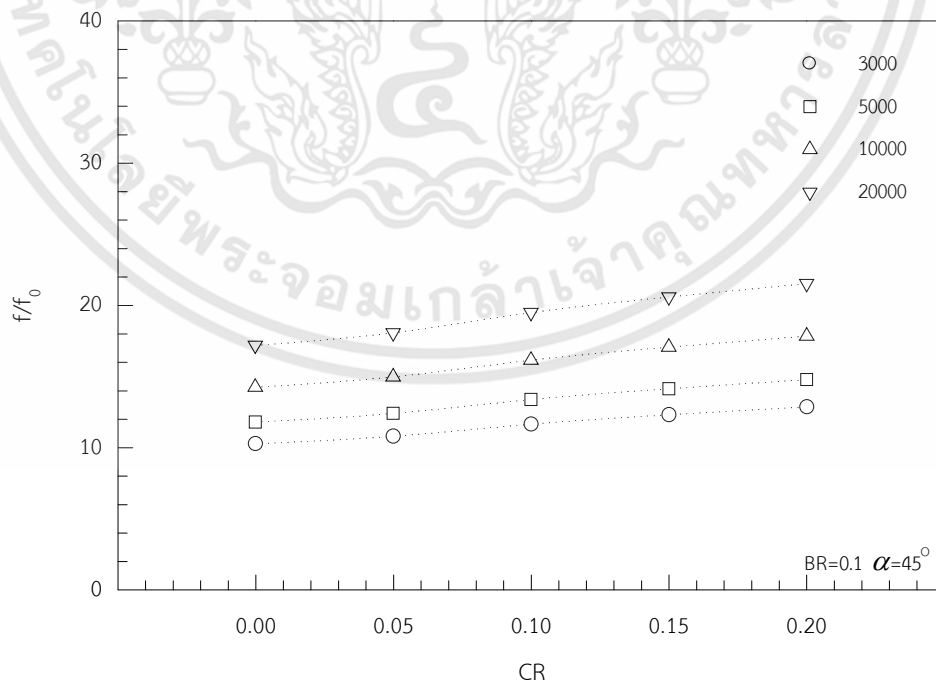
รูปที่ 4.18 ค่าเลขนัสเซิลท์เฉพาะจุด (Nu_x) บนผนังที่ $Re=3000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบจากค่า CR ต่อค่า Nu_x เกิดขึ้นบนผนังที่ $CR=0.0-0.20$ และ $Re=3000$ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.18 จากสรุปพบว่า ที่กรณี $CR=0.0-0.05$ การไหลมีกระแทกทั้งผนังด้านบนและด้านล่าง ทำให้มีค่า Nu_x สูงทั่วผนังทุกด้าน ยกเว้นที่บริเวณมุมของท่อจัตุรัส ในขณะที่ $CR=0.10-0.20$ มีค่า Nu_x ต่ำกว่า บริเวณที่เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอยู่ที่บริเวณด้านข้างของผนัง



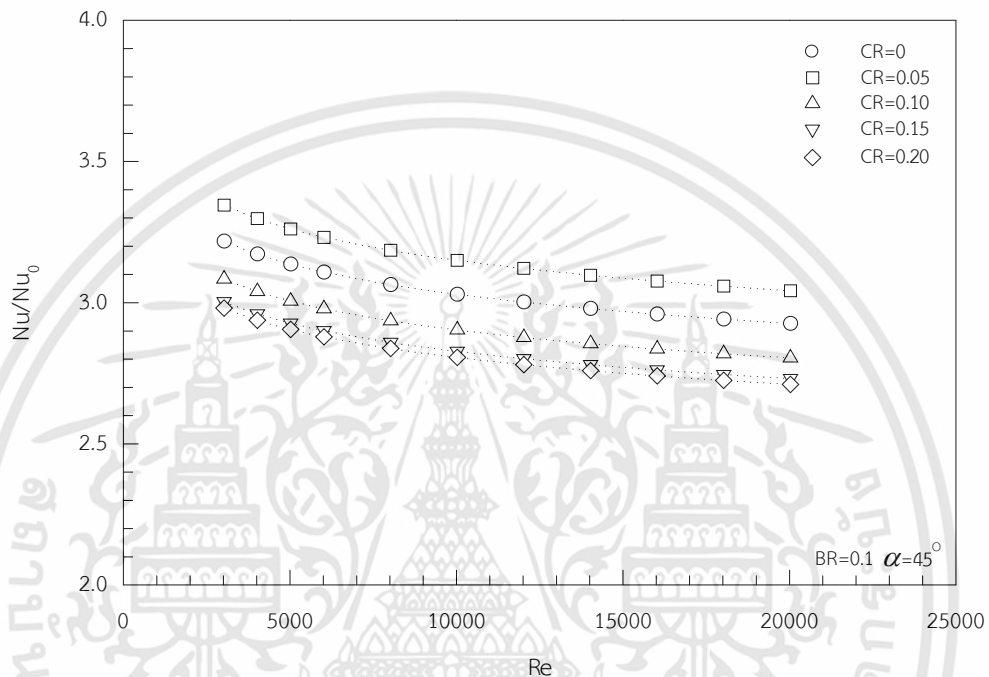
รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง CR



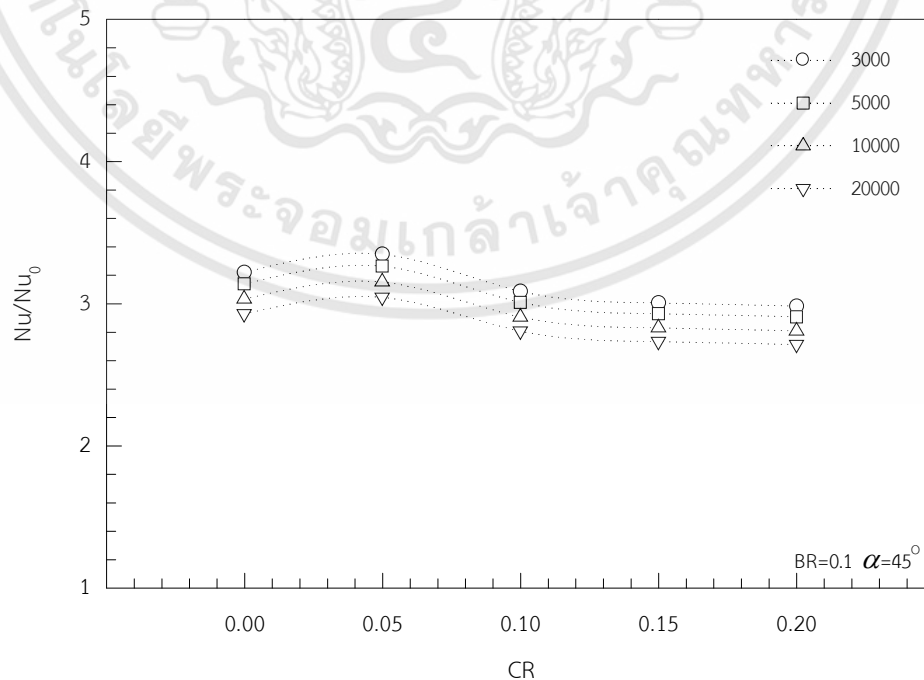
รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ CR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงการเปลี่ยนแปลง f/f_0 เมื่อเปลี่ยนแปลง Re และ CR จากรูปพบว่า f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ Re การติดตั้งแผ่นกั้นแบบติดผนังที่ CR=0.0 มีค่า f/f_0 ต่ำสุด และค่า f/f_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะลอยตัวของแผ่นกั้นในทุกค่า Re การติดตั้งแผ่นกั้นทำให้ f/f_0 เพิ่มขึ้น 10.3-21.5 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ ที่กรณี CR=0.20 Re=20,000 มีค่า f/f_0 สูงที่สุดเท่ากับ 21.5 เท่า



รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง CR



รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ CR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re

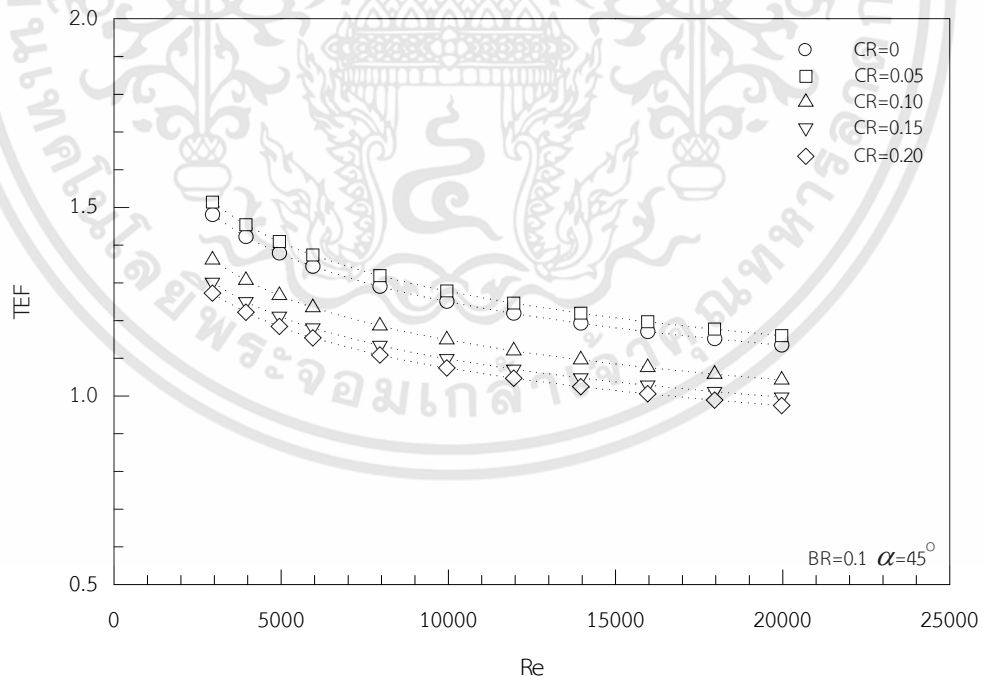
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re ในรูปที่ 4.21 พบว่า ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่ $Re=3000$ และ Nu/Nu_0 ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ Re ในทุกกรณี การจัดวางแผ่นกั้นในช่องทางการไหลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นกว่าท่อผิวเรียบ 2.71-3.34 เท่า

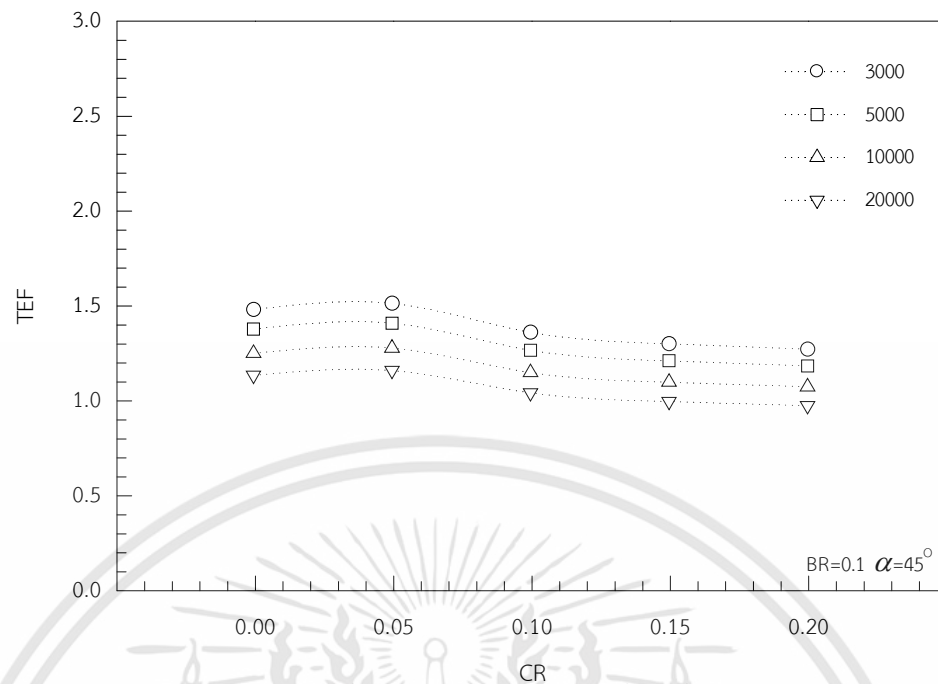
รูปที่ 4.22 แสดงการเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 เมื่อเปลี่ยนแปลง CR ค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก $CR=0.0$ ไปจนถึง $CR=0.05$ เมื่อแผ่นกั้นถูกจัดวางให้ยกลอยตัวสูงขึ้นไปอีก Nu/Nu_0 มีกลับมามีแนวโน้มลดลงจาก $CR=0.05$ ไปจนถึง $CR=0.20$ สำหรับที่ $CR=0.05$ ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดกว่ากรณีอื่นและมีค่าเท่ากับ 3.34 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ ทั้งนี้การจัดวางแผ่นกั้นที่ $CR=0, 0.05, 0.10, 0.15$ และ 0.20 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 3.21, 3.34, 3.08, 3.00 และ 2.97 เท่า เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ

จากการทดลองการถ่ายเทความร้อนช่องขนานที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นลอยตัว พบว่าที่ $Re=3000$ ให้ค่า TEF สูงที่สุดและลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น

เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นแบบลอยตัว ค่า TEF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการติดแผ่นกั้นชนกับผนังด้านบนและด้านล่าง ($CR=0$) เมื่อติดตั้งแบบยกลอยตัวสูงขึ้นเล็กน้อยที่ $CR=0.05$ จะมีค่า TEF สูงที่สุด และเมื่อติดตั้งแบบยกลอยตัวเพิ่มสูงขึ้นต่อไปอีกจาก $CR=0.05$ ไปถึง 0.20 จะส่งผลให้ค่า TEF มีแนวโน้มลดลง โดยค่า $TEF=1.48, 1.51, 1.36, 1.30$, และ 1.27 ที่ $CR=0, 0.05, 0.10, 0.15$ และ 0.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ Re เมื่อเปลี่ยนแปลง CR



รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ CR เมื่อเปลี่ยนแปลง Re

เนื้อหาบทต่อไปเป็นการแสดงโครงสร้างของแบบจำลองเชิงตัวเลขและรายละเอียดการคำนวณของปัญหาที่สนใจ อธิบายรูปร่าง ขนาด และการจัดวางแหวนรูปตัววีในท่อกลม แสดงวิธีการตรวจสอบและทดสอบแบบจำลองเชิงตัวเลข หลังจากนั้น เนื้อหาในบทที่ 6 เป็นการแสดงผลการตรวจสอบและทดสอบที่ต่อเนื่องมาจากบทที่ 5 เนื้อหาในบทที่ 7 เป็นการแสดงและอธิบายผลการทดสอบเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวนรูปตัววีที่จัดวางในลักษณะที่แตกต่างกันด้วยปัจจัยสำคัญที่ถูกใช้เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนตามที่ได้กล่าวผ่านมาก่อนหน้า พฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่อธิบายด้วยโครงสร้างการไหลถูกแสดงไว้ในบทนี้ด้วยเช่นเดียวกัน

บทที่ 5

ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขสำหรับการไหลผ่านแหวนรูป ตัววี

เนื้อหาในบทนี้แสดงขั้นตอนและระเบียบวิธีการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการตรวจสอบและทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วน เนื้อหาส่วนแรกเป็นการแสดงรูปร่างของแหวนรูปตัววีและการจัดวาง ส่วนถัดไปเป็นการกำหนดขอบเขตของการคำนวณ การสร้างกริด เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น วิธีการคำนวณ การกำหนดเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบ เนื้อหาส่วนสุดท้ายเป็นระเบียบวิธีการตรวจสอบและทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วน

5.1 รายละเอียดการคำนวณ

เนื้อหาส่วนนี้เป็นการแสดงรายละเอียดของการคำนวณเพื่อใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขกับปัญหาที่ศึกษา ส่วนแรกเป็นการแสดงรูปร่างของแหวนรูปตัววีและการจัดวางในท่อกลม ส่วนถัดไปเป็นการแสดงขอบเขตของการคำนวณ โครงสร้างของกริด เงื่อนไขขอบเขตที่ถูกกำหนดจากสมมติฐานในหัวข้อที่ 3.1 เนื้อหาส่วนสุดท้ายเป็นวิธีการคำนวณและการกำหนดเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบ

5.1.1 รูปร่างของแหวนรูปตัววีและการจัดวางสำหรับการจำลองเชิงตัวเลข

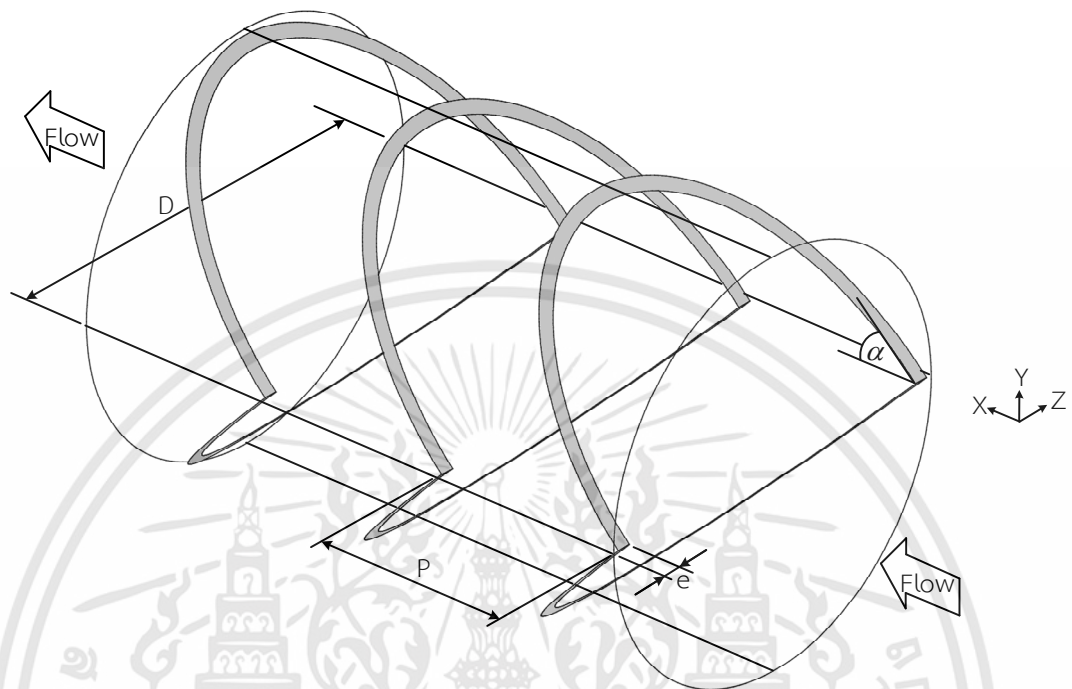
ปัญหาที่สนใจภายใต้การศึกษาเชิงตัวเลขนี้ กำหนดให้เป็นการศึกษาการไหลปั่นป่วนแบบคาบที่การไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์ในท่อกลมที่มีลักษณะความโค้งที่หนึ่ง ชุดของแหวนรูปตัววีถูกจัดวางแบบซึทวนกระแสการไหลอยู่ในท่อกลม โดยที่แหวนแต่ละอันทำมุมปะทะ (Attack angle, α) กับทิศทางการไหลของอากาศเป็นรูปตัววี ตัวแปรของรูปร่างแหวนแสดงอยู่ในรูปที่ 5.1 ประกอบไปด้วย ความสูงของแหวน (e) และคาบหรือระยะพิตซ์ (P) พารามิเตอร์ที่ศึกษากำหนดให้ตัวแปรเหล่านี้สัมพันธ์กับเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (D) ดังนั้นพารามิเตอร์ของรูปร่างที่ศึกษาจึงอยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย

5.1.2 ขอบเขตการคำนวณ

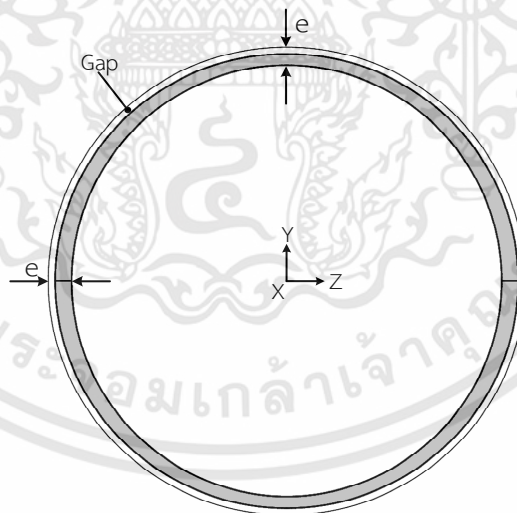
จากลักษณะรูปร่างของปัญหาที่แสดงในรูปที่ 5.1 ขอบเขตแบบคาบ 3 มิติ ที่ใช้เป็นขอบเขตการคำนวณแสดงอยู่ในรูปที่ 5.2 อากาศไหลเข้าที่ทางเข้าด้วยอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ เงื่อนไขพลักซ์ความร้อนคงที่ถูกกำหนดให้กับผนังขอบเขต ขอบเขตทางเข้าและทางออกถูกกำหนดเป็นขอบเขตแบบคาบ เนื่องจากรูปร่างมีลักษณะสมมาตร จึงใช้ขอบเขตการคำนวณเพียง 1 ใน 4 เพื่อลดการคำนวณลง การศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลภายในท่อกลมที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่นี้ ใช้โปรแกรมประยุกต์ DesignModeler ในโปรแกรม ANSYS Workbench ร่วมกับการนำเข้าแบบจำลองของแหวนจากโปรแกรม CATIA เพื่อสร้างแบบจำลองเรขาคณิตที่ใช้เป็นขอบเขตสำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ ระนาบ xy และ xz ถูกใช้เป็นขอบเขตสมมาตร แบบจำลองจึงมีขนาด 1 ใน 4 ส่วน การไหลของของไหลกำหนดให้อยู่ในแนวแกน x



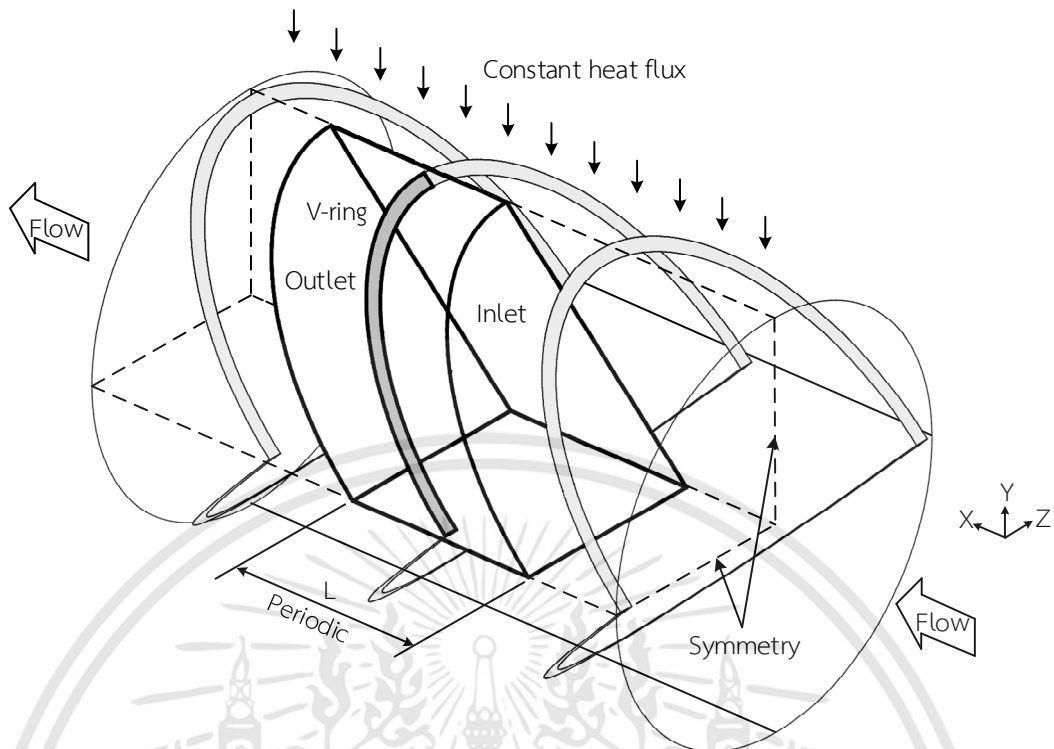
(ก) มุมมองแบบไอโซเมตริก



(ข) มุมมองด้านหน้า

รูปที่ 5.1 รูปร่างแหวนรูปตัววีและการจัดวางสำหรับการคำนวณ

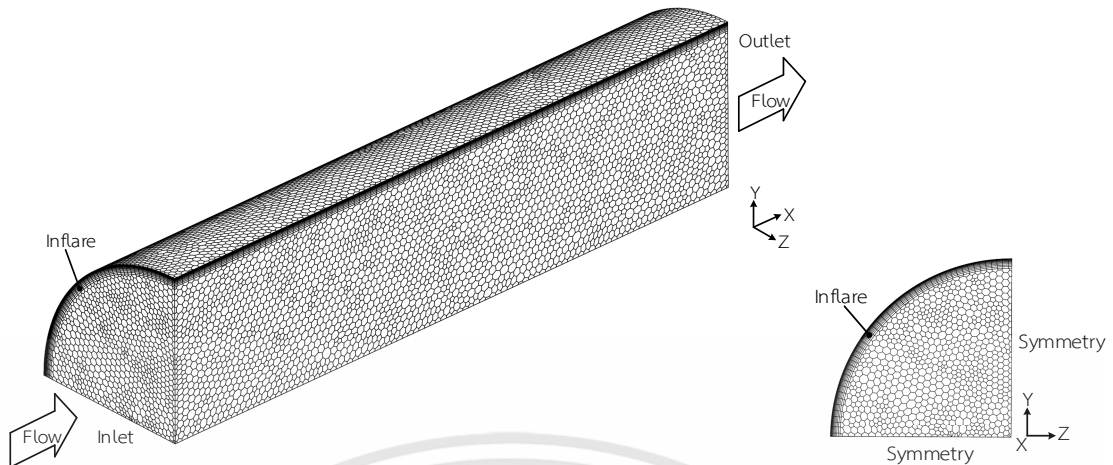
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



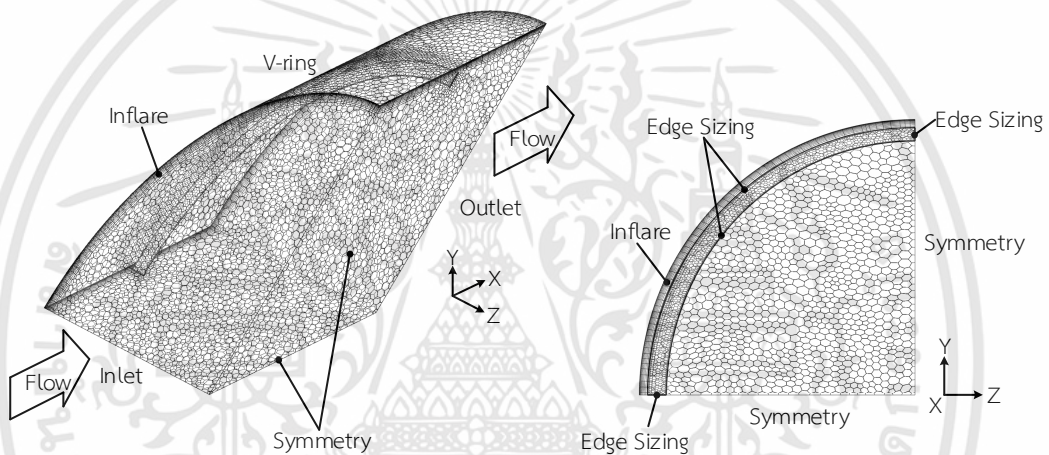
รูปที่ 5.2 ขอบเขตการคำนวณสำหรับแหวนรูปตัววี

5.1.3 การสร้างกริด

การสร้างกริดเป็นการแบ่งขอบเขตปัญหาเป็นส่วนเล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งได้แก่ กริดหรือร่างตาข่าย (Mesh) ของเซลล์ (Cell) หรือปริมาตรควบคุม (Control volume) หรือเอลิเมนต์ (Element) ให้กับวัตถุ ในการศึกษานี้ กริดถูกสร้างด้วยโปรแกรมประยุกต์ Mesh ที่อยู่ในโปรแกรม ANSYS Workbench บนพื้นฐานของการตรวจสอบจำนวนกริดที่เพียงพอ สำหรับการคำนวณการไหลในท่อกลมผิวเรียบและการไหลผ่านแหวนรูปตัววี ขอบเขตการคำนวณที่ถูกสร้างในหัวข้อก่อนหน้าถูกกำหนดให้เป็นกริดแบบ polyhedral จากคำสั่งที่อยู่ในโปรแกรมประยุกต์ FLUENT รูปที่ 5.3 แสดงการกำหนดกริดที่ใช้สำหรับการคำนวณสำหรับท่อกลมผิวเรียบ รูปที่ 5.4 แสดงตัวอย่างของโครงสร้างกริดที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform grid) ที่ใช้สำหรับการคำนวณการไหลผ่านแหวนรูปตัววี เพื่อการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพ ควรเพิ่มจำนวนกริดให้หนาแน่นขึ้นในบริเวณที่ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของการไหลมีการเปลี่ยนแปลงสูง [63] ดังนั้นกริดที่มีความละเอียดจึงถูกสร้างในบริเวณใกล้กับผนังรับความร้อนกับแหวน โครงสร้างกริดจึงมีความหนาแน่นสูงที่บริเวณนี้ ส่วนบริเวณการไหลที่ห่างออกไปจากผนังและแหวนสามารถลดจำนวนกริดให้น้อยลงได้แต่ยังคงให้ค่าของผลเฉลยที่ไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 5.3 โครงสร้างกริดที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับท่อกลมผิวเรียบ



รูปที่ 5.4 โครงสร้างกริดที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับท่อกลมที่ใส่แหวนรูปตัววี

5.1.4 เงื่อนไขที่ขอบและเงื่อนไขเริ่มต้น

การจำลองใช้เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นดังต่อไปนี้

- ใช้การจำลองภายใต้เงื่อนไขขอบเขตแบบคาบที่ทางเข้าและทางออกของแต่ละหน่วยของคาบ
- กำหนดขอบเขตแบบสมมาตรเพื่อลดขนาดของแบบจำลอง
- ผนังอยู่กับที่ ไม่มีการสั่นไถลของอากาศที่ผนัง
- พลั๊กซ์ความร้อนคงที่ที่ผนังท่อ
- แหวนรูปตัววีถูกกำหนดให้เป็นฉนวน
- อุณหภูมิอากาศทางเข้ากำหนดเป็น 300K
- ของไหลเป็นอากาศที่มีคุณสมบัติคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5 ระเบียบวิธีการคำนวณและเกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบ

สมการพีชคณิตสำหรับการไหลแบบคงตัวเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น จึงต้องถูกปรับแก้ด้วยวิธีการที่ทำให้เป็นสมการเชิงเส้น (Linearization method) และใช้ระเบียบวิธีการทำซ้ำ (Iteration scheme) เพื่อหาคำตอบของสมการพีชคณิต ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการศึกษานี้แสดงอยู่ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ระเบียบวิธีที่ใช้ในการคำนวณวิธีเชิงตัวเลข

พารามิเตอร์	ระเบียบวิธี, ค่าคงที่
แบบจำลองความปั่นป่วน	
Viscous Model	RNG $k-\epsilon$
Near-Wall Treatment	Enhanced Wall Treatment
Model Constants	
C_μ , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, Wall Prandtl Number	0.0845, 1.42, 1.68, 0.85
ระเบียบวิธี	
Solver type	Pressure-based
Pressure-velocity coupling	SIMPLE
Gradient	Least squares cell based
Pressure	Second Order
Momentum	QUICK
Turbulent Kinetic Energy (k)	QUICK
Turbulent Dissipation Rate (ϵ)	QUICK
Energy	QUICK

การจำลองเชิงตัวเลขจะถือว่าได้คำตอบเมื่อเศษตกค้างของตัวแปรลดลงต่ำกว่า 1×10^{-5} ยกเว้นสมการพลังงาน ที่เกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบกำหนดไว้ต่ำกว่า 1×10^{-9} เกณฑ์ของการลู่เข้าสู่คำตอบแสดงอยู่ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เศษตกค้างของตัวแปรและเกณฑ์ของการเข้าสู่คำตอบ

พารามิเตอร์	เกณฑ์ของการเข้าสู่คำตอบ
สมการความต่อเนื่อง	10^{-5}
x-velocity	10^{-5}
y-velocity	10^{-5}
z-velocity	10^{-5}
สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k)	10^{-5}
สมการอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (ϵ)	10^{-5}
พลังงาน	10^{-9}

เนื้อหาในส่วนถัดไปเป็นการอธิบายและสรุปวิธีการที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและทดสอบกระบวนการที่ใช้ในแบบจำลอง

5.2 ขั้นตอนการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน

การตรวจสอบเป็นกระบวนการในการหาความแม่นยำของแบบจำลองเชิงคำนวณ (Computational model) ที่แสดงลักษณะแนวคิดของขอบเขตปัญหาที่สนใจ เนื้อหาในส่วนนี้แสดงลำดับของวิธีการตรวจสอบจากค่าความผิดพลาดของแบบจำลองเชิงตัวเลข เริ่มต้นจากการตรวจสอบจำนวนกริดที่เพียงพอสำหรับการทดสอบ การหาดัชนีการเข้าสู่ของกริด การตรวจสอบแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองที่เป็นที่ยอมรับ โดยการตรวจสอบเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขและผลการทดลองอยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด

5.2.1 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เพียงพอสำหรับการทดสอบ

จำนวนกริดที่สูงมีผลต่อความแม่นยำของคำตอบ จำนวนกริดที่ต่ำอาจนำไปสู่คำตอบที่ไม่ถูกต้อง การทดลองเพิ่มจำนวนกริด (Grid refinement) จะถูกทำซ้ำจนกว่าคำตอบของการคำนวณไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญหรือมีการเปลี่ยนแปลงในระดับที่น่าพอใจ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จำนวนกริดที่ทำให้คำตอบเป็นอิสระจากการเพิ่มจำนวนกริดเรียกว่า Grid independence จำนวนกริดนี้จะถือว่าสามารถนำไปใช้สำหรับการทดสอบการจำลองเชิงตัวเลขต่อไปได้ หากคำตอบยังคงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าจำนวนกริดที่ต้องการยังไม่ละเอียดเพียงพอ สำหรับการศึกษานี้ การตรวจสอบจำนวนกริดที่เพียงพอ ขนาดกริด (Grid resolution) ถูกแบ่งออกเป็นหลายระดับ พารามิเตอร์ที่ใช้เพื่อสังเกตหาจำนวนกริดที่เหมาะสม ได้แก่ ค่าตัวประกอบเสียดทาน ค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ย และค่า y^+ การกำหนดพารามิเตอร์และผลของการตรวจสอบจำนวนกริดแสดงอยู่ในบทถัดไป

5.2.2 การตรวจสอบแบบจำลองความปั่นป่วนกับสหสัมพันธ์สำหรับการไหลในท่อกลมผิวเรียบ

ขั้นตอนแรกของการหาความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วนคือการทำการทดสอบการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลในท่อกลมผิวเรียบ ต่อจากนั้นจะนำค่าตัวประกอบเสียดทานหรือ f_0 และค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยหรือ Nu_0 สำหรับท่อกลมผิวเรียบเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ที่เป็นที่ยอมรับ

โดยค่าตัวประกอบเสียดทานสำหรับท่อกลมผิวเรียบถูกเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นของ Blasius [74], Filonenko [75] และ Konakov [76] ส่วนค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยสำหรับท่อกลมผิวเรียบถูกนำมาเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter [77] และ Gnielinski [78-81]

สหสัมพันธ์ของ Blasius เป็นที่นิยมและถูกใช้อย่างกว้างขวางสำหรับหาค่าตัวประกอบเสียดทานที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมผิวเรียบ ถูกนำเสนอขึ้นตั้งแต่ปี 1911 และยังคงมีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

สหสัมพันธ์ของ Blasius กำหนดโดย

$$f = 0.3164 Re^{-1/4} \quad ; \quad 3000 \leq Re \leq 10^5 \quad (5.1)$$

สหสัมพันธ์ของ Filonenko เป็นสมการที่ใช้สำหรับหาค่าตัวประกอบเสียดทานซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างมาก ช่วงการใช้งานอยู่ที่ $4000 \leq Re \leq 10^8$ [82] ทั้ง Petukhov [83] และ Gnielinski [78-81] ต่างใช้สหสัมพันธ์ค่าตัวประกอบเสียดทานนี้ในการคำนวณค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยสำหรับท่อกลมผิวเรียบ โดยเฉพาะ Gnielinski [78-81] ได้ใช้และแนะนำให้ใช้ค่าตัวประกอบเสียดทานของ Filonenko เพื่อหาค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยในสมการที่ 5.7 ซึ่งในภายหลังถูกนำไปอ้างอิงต่อเป็นจำนวนมาก

สหสัมพันธ์ของ Filonenko กำหนดโดย

$$f = \begin{cases} (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} \\ (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \end{cases} \quad ; \quad 4000 \leq Re \leq 10^8 \quad (5.2)$$

แม้ว่า Blasius [74] จะระบุช่วงของเลขเรย์โนลด์สำหรับการใช้งานไว้ก็ตาม แต่ไม่ได้ระบุความแม่นยำ (Accuracy) ที่ดีของการใช้งานในช่วงเลขเรย์โนลด์ดังกล่าว Taler [84] ระบุว่าความแม่นยำของสมการ Blasius จะลดลงเมื่อ $Re \geq 10^5$ ในขณะที่ Fang et al. [85] ระบุว่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error) จะเพิ่มขึ้นจาก -2.6% เป็น -22.2% ที่ $Re = 2 \times 10^6$ ไปจนถึง 10^8 เมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์ค่าตัวประกอบเสียดทาน Prandtl-Kármán-Nikuradse (PKN) ดังนั้นการใช้งานสหสัมพันธ์ของ Blasius หากจำกัดการใช้งานอยู่ที่ $Re \leq 2 \times 10^4$ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุด -2.62% ส่วนสหสัมพันธ์ของ Filonenko มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุด 2%

ในช่วง $10^4 \leq Re \leq 10^8$ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ช่วงการใช้งานเลขเรย์โนลด์ตามที่ Fang et al. [85] ระบุไว้ ดังแสดงในตารางที่ 5.3

นอกจากสหสัมพันธ์ของ Filonenko แล้ว Gnielinski [81] ยังแนะนำสหสัมพันธ์ของ Konakov [76] ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าสหสัมพันธ์ของ Filonenko ช่วงการใช้งานอยู่ที่ $3000 \leq Re \leq 10^8$ Taler [84]

สหสัมพันธ์ของ Konakov กำหนดโดย

$$f = (1.8 \log Re - 1.5)^{-2} \quad ; \quad 3000 \leq Re \leq 10^8 \quad (5.3)$$

Fang et al. [85] เสนอสหสัมพันธ์ค่าตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับท่อกลมผิวเรียบที่มีช่วงการใช้งานอยู่ในช่วง $Re = 3000 - 10^8$ ที่มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยอยู่ที่ 0.022% และความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดที่ -0.045% เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของ Nikuradse

สหสัมพันธ์ของ Fang et al. [85] กำหนดโดย

$$f = 0.25 \left[\log \left(\frac{150.39}{Re^{0.98865}} - \frac{152.66}{Re} \right) \right]^{-2} \quad ; \quad 3000 \leq Re \leq 10^8 \quad (5.4)$$

ตารางที่ 5.3 สหสัมพันธ์ค่าตัวประกอบเสียดทานที่ใช้ทดสอบการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมผิวเรียบ

ผู้คิดค้น	สหสัมพันธ์	ช่วงเลขเรย์โนลด์ที่แนะนำ
Blasius	$f = 0.3164 Re^{-1/4}$	$3000 \leq Re \leq 2 \times 10^4$
Filonenko	$f = \begin{cases} (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} \\ (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \end{cases}$	$10^4 \leq Re \leq 10^8$
Konakov	$f = (1.8 \log Re - 1.5)^{-2}$	$3000 \leq Re \leq 10^8$
Fang et al.	$f = 0.25 \left[\log \left(\frac{150.39}{Re^{0.98865}} - \frac{152.66}{Re} \right) \right]^{-2}$	$3000 \leq Re \leq 10^8$

ค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับท่อกลมผิวเรียบถูกนำมาเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter [77, 86] ในสมการที่ 5.5 สหสัมพันธ์นี้ใช้ประเมินการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมผิวเรียบของการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์เท่านั้น [77] สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์คือ $Re > 8000$ [87] หรือ $Re > 10,000$ [70, 88]

สหสัมพัทธ์ของ Dittus-Boelter กำหนดโดย

$$\text{Nu} = 0.0243 \text{Re}^{4/5} \text{Pr}^{2/5} ; \text{Re} \geq 10^4 \quad (5.5)$$

แม้ว่าสหสัมพัทธ์ของ Dittus-Boelter จะมีรูปแบบของสมการที่ง่ายต่อการใช้งานและถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง [89] แต่สมการนี้มีความคลาดเคลื่อน (Error) ที่ค่อนข้างสูงคือ 25% สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนนี้สามารถทำให้ลดลงได้ต่ำกว่า 10% เมื่อเปลี่ยนมาใช้สหสัมพัทธ์ของ Petukhov-Kirillov [83] ในสมการที่ 5.6 และสหสัมพัทธ์ของ Gnielinski สมการที่ 5.7 [78-81]

สหสัมพัทธ์ของ Petukhov-Kirillov [83] ในสมการที่ 5.6 สามารถเทียบเคียงกันได้เป็นอย่างดีกับสหสัมพัทธ์ของ Gnielinski [78] ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่พัฒนาอย่างเต็มที่ มีความแม่นยำ 5-6% ในช่วง $10^4 \leq \text{Re} \leq 5 \times 10^6$ และ $0.5 \leq \text{Pr} \leq 2000$ [83] สหสัมพัทธ์นี้ใช้คำนวณการไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์เท่านั้น ไม่สามารถใช้ได้กับช่วงทรานซิชันและไม่ได้อธิบายเกี่ยวกับผลจากความยาวทางเข้าไว้ [78]

สหสัมพัทธ์ของ Petukhov-Kirillov กำหนดโดย

$$\text{Nu} = \frac{(f/8) \text{Re} \text{Pr}}{1.07 + 12.7(f/8)^{1/2} (\text{Pr}^{2/3} - 1)} ; \left[\begin{array}{l} 10^4 \leq \text{Re} \leq 5 \times 10^6 \\ 0.5 \leq \text{Pr} \leq 2000 \end{array} \right] \quad (5.6)$$

จากสหสัมพัทธ์ของ Petukhov-Kirillov มีข้อจำกัดคือไม่สามารถใช้ทำนายผลในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำ ๆ และเพื่อให้สหสัมพัทธ์เข้ากันได้กับผลทดลองในช่วง $2300 \leq \text{Re} \leq 10^4$ Gnielinski [78-81] ปรับปรุงสหสัมพัทธ์นี้โดยการแทนที่ Re ด้วย Re-1000 คลอบคลุมการใช้งานในช่วงทรานซิชันไปถึงเลขเรย์โนลด์สูง ๆ การใช้งานอยู่ในช่วง $2300 \leq \text{Re} \leq 10^6$ และ $0.6 \leq \text{Pr} \leq 2000$ โดยสามารถใช้ค่าตัวประกอบเสียดทานได้ทั้งจากสหสัมพัทธ์ของ Filonenko ในสมการที่ 5.2 และสหสัมพัทธ์ของ Konakov ในสมการที่ 5.3 หรือจาก Moody diagram (เฉพาะท่อกลมผิวเรียบ) ของ Moody [90] สมการนี้เป็นสมการที่เชื่อถือได้มากที่สุดในปัจจุบัน มีการนำไปใช้ในงานด้านวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง และถูกอ้างอิงในบทความต่าง ๆ เป็นจำนวนมากรวมถึงตำราที่เป็นที่นิยมอย่าง Incropera [82] และ Cengel [89] สำหรับการศึกษาที่สหสัมพัทธ์ค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยที่ใช้ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 5.4

สหสัมพัทธ์ของ Gnielinski กำหนดโดย

$$\text{Nu} = \frac{(f/8)(\text{Re}-1000) \text{Pr}}{1 + 12.7(f/8)^{1/2} (\text{Pr}^{2/3} - 1)} ; \left[\begin{array}{l} 2300 \leq \text{Re} \leq 10^6 \\ 0.6 \leq \text{Pr} \leq 2000 \\ 0 \leq d/L \leq 1 \end{array} \right] \quad (5.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 สหสัมพันธ์ค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยที่ใช้ทดสอบการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมผิวเรียบ

ผู้คิดค้น	สหสัมพันธ์	ช่วงการใช้งานที่แนะนำ
Dittus-Boelter	$Nu = 0.0243 Re^{4/5} Pr^{2/5}$	$\left[\begin{array}{l} Re \geq 10^4 \\ 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ L/D \geq 10 \end{array} \right]$ [70]
Gnielinski	$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)}$	$\left[\begin{array}{l} 2300 - 3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6 \\ 0.5 \leq Pr \leq 2000 \\ L/D \geq 10 \end{array} \right]$ [89]

นอกจากนี้ ยังเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยกับผลการทดลองของ Chingtuaythong [2] ที่ถูกนำมาอ้างอิงสำหรับการศึกษาวิจัยนี้ ซึ่งมีสหสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยดังสมการที่ 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ

$$f = 0.442 Re^{-0.28} \quad (5.8)$$

$$Nu = 0.0435 Re^{0.738} Pr^{0.4} \quad (5.9)$$

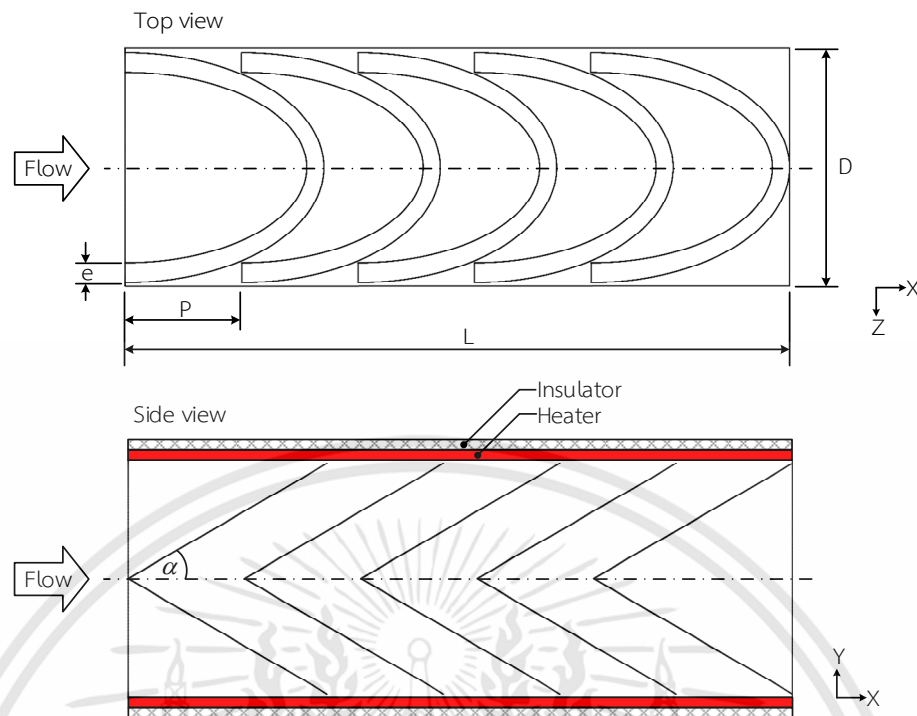
5.3 ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองการไหลผ่านแหวนรูปตัววี

ข้อมูลการทดลองเป็นสิ่งสำคัญสำหรับกระบวนการทดสอบแบบจำลอง เนื้อหาในส่วนนี้แสดงข้อมูลและอธิบายการจัดการการทดลองที่ใช้สำหรับการทดสอบแบบจำลองและประเมินความไม่แน่นอนของการทดลอง

5.3.1 ข้อมูลจากการทดลอง

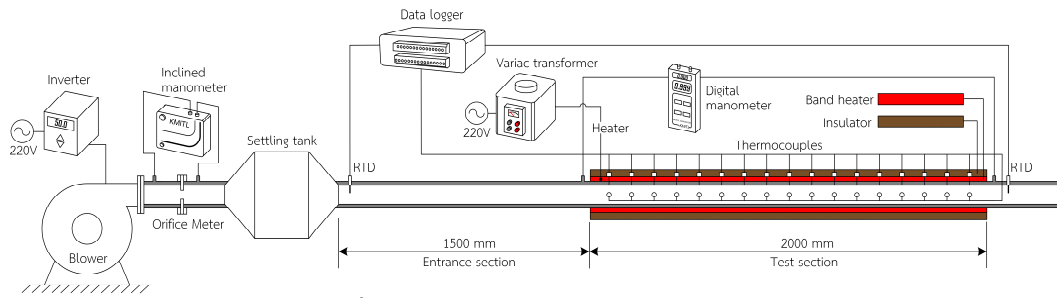
ขอบเขตการคำนวณเป็นการนำข้อมูลจาก Chingtuaythong [2] ลักษณะการทดลองเป็นการทดสอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีแหวนรูปตัววีภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน อัตราการไหลของอากาศที่ผ่านส่วนทดสอบอยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5000-25,000 พารามิเตอร์ของรูปร่างแหวนรูปตัววีประกอบไปด้วย ความสูงของแหวน (e) และระยะพิตช์ (P) การทดลองเป็นการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนความสูง (BR) อัตราส่วนระยะพิตช์ (PR) และอิทธิพลของมุมปะทะ (α) ของแหวนรูปตัววี รูปร่างและการจัดวางแหวนสำหรับการทดลองแสดงอยู่ในรูปที่ 5.5 แหวนทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 3 mm ชุดของแหวนรูปตัววีที่ถูกจัดวางด้วยระยะพิตช์คงที่จากโครงลวด 2 เส้น ทั้งหมดถูกใส่เข้าไปในท่อกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 50.8 mm ด้านนอกของท่อกลมมีการติดตั้งแผ่นทำความร้อนแบบปลอก (Band heater) เพื่อให้ฟลักซ์ความร้อนกับผนังช่วงส่วนทดสอบ และหุ้มฉนวนเซรามิกสีไฟเบอร์ เพื่อลดการสูญเสียความร้อนออกไปนอกระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 รูปร่างของแหวนรูปตัววีและการจัดวางในส่วนทดสอบ [2]

แผนผังชุดทดลองแสดงอยู่ในรูปที่ 5.6 ช่องทางการไหลมี 3 ส่วนคือ ช่วงทางเข้ามีระยะ 1500 mm (30D) ช่วงทดสอบมีความยาว 2000 mm (40D) และช่วงทางออกมีความยาว 500 mm (10D) อากาศถูกเป่าเข้าสู่ชุดทดลองด้วยเครื่องเป่าลมความเร็วสูงขนาด 1.5 kW ที่ควบคุมอัตราการไหลของอากาศในช่วงเลขเรย์โนลด์ที่ต้องการด้วยอินเวอร์เตอร์ มานอมิเตอร์แบบเอียงถูกใช้เพื่อวัดความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิสที่ถูกสร้างตามมาตรฐาน ASME MFC-3M และผ่านการสอบเทียบกับเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด เพื่อใช้คำนวณอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านส่วนทดสอบ นอกจากนี้ มานอมิเตอร์แบบดิจิตอลถูกใช้เพื่อวัดความดันตกคร่อมส่วนทดสอบ ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบค่าความต้านทาน PT-100 ถูกติดตั้งเพื่อวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของส่วนทดสอบ เทอร์โมคัปเปิลแบบ K ถูกติดตั้งเป็นระยะเท่ากัน เพื่อวัดอุณหภูมิที่ผนังด้านบนและด้านข้างอย่างละ 21 ตำแหน่ง เครื่องบันทึกข้อมูลถูกใช้เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิ แผ่นทำความร้อนถูกควบคุมด้วยหม้อแปลงแบบปรับค่าได้ เพื่อให้สามารถกำหนดเงื่อนไขความร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันตกคร่อมที่นำไปใช้เป็นข้อมูลที่สภาวะคงตัว พารามิเตอร์ของรูปร่างและสภาวะการไหลที่ใช้ในการตรวจสอบแสดงในตารางที่ 5.1 ส่วนค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขแสดงในตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.6 แผนผังของชุดการทดลอง [2]

การประมาณความไม่แน่นอนจากการทดลองถูกแสดงจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ถ้า R เป็นฟังก์ชันที่กำหนดขึ้นของตัวแปรอิสระ X, Y, \dots ดังนั้น $R = R(X, Y, \dots)$ และ $\Delta X, \Delta Y, \dots$ เป็นความไม่แน่นอนในตัวแปรอิสระเหล่านี้ ความไม่แน่นอน R สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial X} \Delta X\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial Y} \Delta Y\right)^2 + \dots} \quad (5.10)$$

ค่าความไม่แน่นอนเกิดจากการวัดขนาด ออร์ฟิส มานอมิเตอร์ และการวัดอุณหภูมิ สำหรับความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์พื้นฐานได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.5 เช่น ค่าความไม่แน่นอนของการประมาณค่าเลขเรย์โนลด์ ค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ย และค่าตัวประกอบเสียดทาน คือ 5%, 7.6% และ 9.5% ตามลำดับ

ตารางที่ 5.5 การวัดความไม่แน่นอนจากการติดตั้งการทดลอง

พารามิเตอร์	ความไม่แน่นอนสูงสุด (%)
เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ, D	0.04
ความเร็วเฉลี่ย, U_m	0.86
ค่าเลขเรย์โนลด์	5
อุณหภูมิ, T	2.8
ความแตกต่างของอุณหภูมิ, ΔT	3.96
ความร้อนสุทธิ, Q_{net}	0.04
ความดันตกคร่อม, ΔP	1.5
ค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ย	7.6
ค่าตัวประกอบเสียดทาน	9.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เมื่อผลการคำนวณเชิงตัวเลขถูกเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ที่น่าเชื่อถืออย่าง Blasius, Filonenko, Dittus-Boelter หรือ Gnielinski ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error) ของค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยคือ $((f_{0(\text{Pred})} - f_{0(\text{St})})/f_{0(\text{St})}) \times 100\%$ และ $((\text{Nu}_{0(\text{Pred})} - \text{Nu}_{0(\text{St})})/\text{Nu}_{0(\text{St})}) \times 100\%$ ตามลำดับ เมื่อ $f_{0(\text{Pred})}$ และ $f_{0(\text{St})}$ เป็นค่าตัวประกอบเสียดทานของการคำนวณเชิงตัวเลขและจากสหสัมพันธ์ตามลำดับ ส่วน $\text{Nu}_{0(\text{Pred})}$ และ $\text{Nu}_{0(\text{St})}$ เป็นค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยของการคำนวณเชิงตัวเลขและจากสหสัมพันธ์ตามลำดับ ขณะที่การเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดลอง 2 ชุด ระหว่างผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง ค่าความคลาดเคลื่อนจะถูกคิดในรูปของค่าความแตกต่าง สามารถทำได้โดยการหาผลต่างเทียบกับค่าเฉลี่ยระหว่างผลการทดลองของทั้ง 2 ชุด

ดังนั้นค่าความแตกต่างของค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยคือ $((f_{0(\text{Pred})} - f_{0(\text{Exp})})/(f_{0(\text{Pred})} + f_{0(\text{Exp})})/2) \times 100\%$ และ $((\text{Nu}_{0(\text{Pred})} - \text{Nu}_{0(\text{Exp})})/(\text{Nu}_{0(\text{Pred})} + \text{Nu}_{0(\text{Exp})})/2) \times 100\%$ ตามลำดับ เมื่อ $f_{0(\text{Exp})}$ และ $\text{Nu}_{0(\text{Exp})}$ คือค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยจากผลการทดลองตามลำดับ

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานถูกใช้เพื่อวัดการกระจายของผลการทดลองเชิงตัวเลข โดยที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกำหนดจาก

$$S.D. = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.11)$$

เมื่อ $S.D.$ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด N ส่วน x_i คือข้อมูลตัวที่ 1, 2, 3, ..., N ที่มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตของตัวอย่าง \bar{x}

เนื้อหาในบทต่อไปเป็นการตรวจสอบและทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน การตรวจสอบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลองและสหสัมพันธ์ที่เป็นที่ยอมรับถูกแสดงอยู่ในหัวข้อผลการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน หลังจากนั้นผลการทดลองเชิงตัวเลขที่ปรับเปลี่ยนอัตราการใช้ พารามิเตอร์ของรูปร่างแหวนรูปตัววีและการจัดวางจะถูกประเมินค่าตัวประกอบความเสียดทานและค่าการถ่ายเทความร้อนเทียบกับผลการทดลอง

บทที่ 6

ความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน

หลังจากเตรียมการสำหรับขั้นตอนการตรวจสอบและทดสอบจากบทที่ผ่านมา เนื้อหาในบทนี้เป็นกล่าวถึงผลการตรวจสอบความเหมาะสมและการทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วนเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์และผลการทดลองด้วยระเบียบวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วในบทก่อนหน้า เนื้อหาส่วนแรกเป็นการแสดงการกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องสำหรับการหาคำตอบเชิงตัวเลขของการไหล เนื้อหาส่วนที่สองเป็นการหาจำนวนกริดที่เพียงพอสำหรับการคำนวณ เพื่อใช้สำหรับการทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองการไหลผ่านแหวนรูปตัววี เนื้อหาส่วนถัดไปเป็นการตรวจสอบแบบจำลองความปั่นป่วนในท่อกลมผิวเรียบ ผลการทดสอบแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียหายและความเค้นการถ่ายเทความร้อนกับสหสัมพันธ์ที่เป็นที่ยอมรับ เนื้อหาส่วนสุดท้ายแสดงการทดสอบ (Validate) ผลเชิงคำนวณของค่าตัวประกอบความเสียหายและความเค้นการถ่ายเทความร้อนกับผลการทดลองด้วยจำนวนกริดที่เหมาะสมที่ได้จากเนื้อหาส่วนที่สอง

6.1 ขอบเขตการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อน

ขอบเขตของการคำนวณนำข้อมูลการสูญเสียความดันและการถ่ายเทความร้อนจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chingtuaythong [2] โดยมีพารามิเตอร์ของรูปร่างปัญหา สภาพการไหลและสภาวะทางความร้อนของการตรวจสอบแสดงในตารางที่ 6.1 การกำหนดคุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความหนืด หรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้มีค่าคงที่เป็นสิ่งที่ยอมรับได้ เนื่องจากการผันแปรของพารามิเตอร์ของการไหลที่ขึ้นกับค่าคุณสมบัติเหล่านี้มีค่าน้อยมาก ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในการเข้าสู่คำตอบอย่างรวดเร็วเมื่อกำหนดคุณสมบัติของของไหลให้มีค่าคงที่ [60] สำหรับการศึกษาี้ คุณสมบัติของอากาศที่ทางเข้ากำหนดไว้ที่อุณหภูมิ 300K ดังที่แสดงในตารางที่ 6.2 เงื่อนไขขอบเขตแบบคาบ ความร้อนที่ผนัง อุณหภูมิที่ทางเข้า แหวนรูปตัววีที่เป็นฉนวนถูกกำหนดในขอบเขตการคำนวณ แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้คือ RNG $k-\epsilon$ ร่วมกับการจำลองการไหลใกล้ผนังแบบ enhanced wall treatment ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขในตารางที่ 5.1 ถูกใช้เพื่อหาคำตอบ คุณสมบัติของอากาศที่ทางเข้าสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขของการทดสอบการไหลในบทนี้ ถูกกำหนดเช่นเดียวกับการทดสอบที่ผ่านมาและถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 4.6 อัตราการไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลในท่อกลมผิวเรียบและท่อที่มีแหวนตามเลขเรย์โนลด์ที่กำหนด แสดงอยู่ในตารางที่ 6.3 การคำนวณเพื่อหาคำตอบจะถูกกระทำด้วยระเบียบวิธีทำซ้ำจนกว่าจะถึงเกณฑ์ของการเข้าสู่คำตอบ

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของรูปร่างและสภาวะการไหลที่ใช้ตรวจสอบและทดสอบแหวนรูปตัววี

พารามิเตอร์	ค่า, ค่าคงที่
สภาวะของการไหลและสภาวะทางความร้อน	
ของไหลทดสอบ	อากาศ
เลขเรย์โนลด์ (Re)	5000–20,000
ฟลักซ์ความร้อน (q_s)	600 W/m ²
ท่อและแหวนรูปตัววี	
เส้นผ่าศูนย์กลางท่อกลม (D)	50.8 mm
ความยาวคาบ (L)	เท่ากับระยะพิตช์
ความสูงแหวน (e)	5 mm
อัตราส่วนความสูงแหวน (BR=e/D)	0.1
ระยะพิตช์ (P)	75 mm
อัตราส่วนระยะพิตช์ (PR=P/D)	1.5
มุมปะทะ (α)	30°

ตารางที่ 6.2 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข [73]

พารามิเตอร์	ค่าคงที่
คุณสมบัติของแหวนรูปตัววี (300K)	
วัสดุ	อลูมิเนียม
ความหนาแน่น (ρ)	2702 kg/m ³
ความจุความร้อนจำเพาะ (C_p)	903 J/kg.K
ค่าการนำความร้อน (k)	237 W/m ² .K
คุณสมบัติของอากาศ (300K, 1atm)	
ความหนาแน่น (ρ)	1.1614 kg/m ³
ความจุความร้อนจำเพาะ (C_p)	1007 J/kg.K
ค่าการนำความร้อน (k)	0.0263 W/m ² .K
ค่าความหนืดพลวัต (μ)	1.846x10 ⁻⁵ kg/m.s
ค่าความหนืดจลน์ (ν)	1.589x10 ⁻⁵ m ² /s
เลขพรานด์ (Pr)	0.707
อุณหภูมิทางเข้า (T_{inlet})	300K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลในท่อกลมผิวเรียบ

เลขเรย์โนลด์ (Re)	อัตราการไหล (kg/s)
5000	3.683×10^{-3}
7000	5.156×10^{-3}
9000	6.629×10^{-3}
11,000	8.102×10^{-3}
15,000	11.048×10^{-3}
20,000	14.730×10^{-3}

6.2 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วน

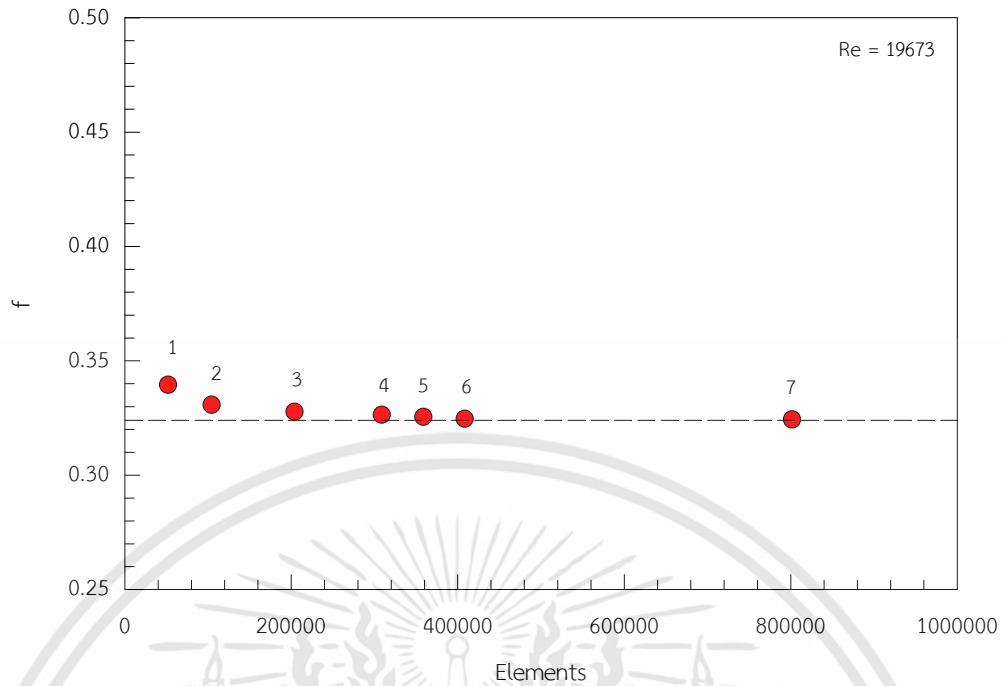
พารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดขนาดกริดของแบบจำลองคือขอบของแหวนรูปตัววี ในการตรวจสอบเพื่อหาจำนวนกริดที่เพียงพอ จำนวนกริดจะถูกเพิ่มทีละ 2 เท่า เริ่มจาก 51,822 กริด (หยาบ) ไปจนถึง 800,230 กริด (ละเอียด) โดยการปรับขนาดเอลิเมนต์ที่ขอบของแหวน การตรวจสอบจำนวนกริดได้ทดสอบกับการติดตั้งแหวนรูปตัววีภายในท่อกลมที่เลขเรย์โนลด์ 19,673 ผลการตรวจสอบเพื่อหาจำนวนกริดที่เหมาะสม แสดงในตารางที่ 6.4

6.2.1 ผลการตรวจสอบจำนวนกริดที่เพียงพอสำหรับการทดสอบแหวนรูปตัววี

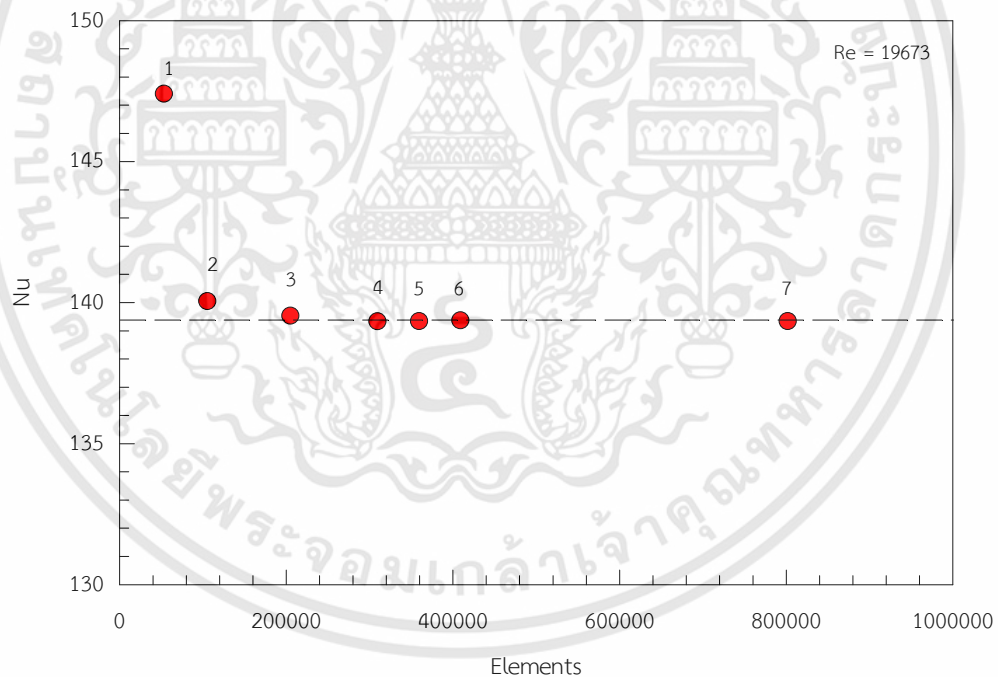
สำหรับการตรวจสอบจำนวนกริดที่เพียงพอสำหรับการทดสอบแหวนรูปตัววีนี้ ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ ค่าตัวประกอบความเสียดทานและค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยกับจำนวนกริดแสดงในรูปที่ 6.1 และ 6.2 ค่าความแตกต่างของค่าตัวประกอบความเสียดทานและค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยแสดงอยู่ในตารางที่ 6.4 เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า ค่าตัวประกอบความเสียดทานและค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยเปลี่ยนแปลงต่ำกว่า 0.5% เมื่อเพิ่มจำนวนกริดจาก 358,064 กริด (กรณี 5) ไปจนถึง 800,230 กริด (กรณี 7) ดังนั้นจำนวนกริดเพียงพอสำหรับการทดสอบการไหลผ่านแหวนรูปตัววีคือ 358,064 กริด

ตารางที่ 6.4 การตรวจสอบจำนวนกริดที่เพียงพอของแบบจำลองแหวนรูปตัววี ที่ $Re=19,673$

กรณี	จำนวนเอลิเมนต์	y^+	f	Friction error (%)	Nu	Nu error (%)
1	51,822	2.4477	0.33964	4.68	147.425	5.775
2	104,050	0.7454	0.33088	1.97	140.077	0.503
3	203,491	0.6093	0.32784	1.04	139.563	0.134
4	307,988	0.5226	0.32648	0.62	139.368	0.006
5	358,064	0.5199	0.32560	0.35	139.375	0.001
6	407,683	0.5111	0.32480	0.10	139.398	0.016
7	800,230	0.4960	0.32447	ค่าอ้างอิง	139.376	ค่าอ้างอิง



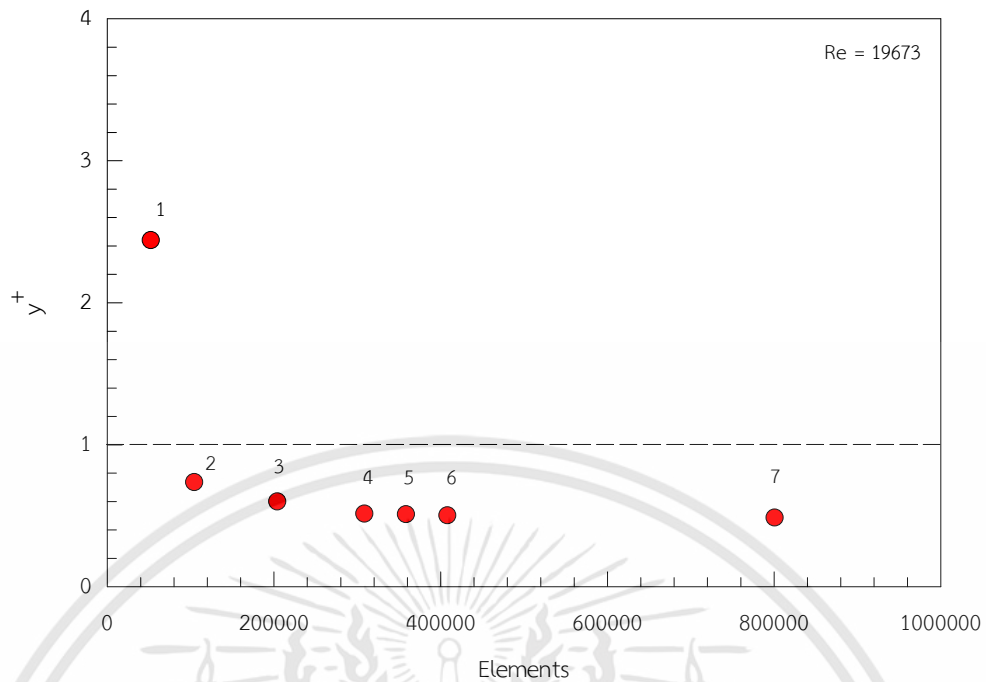
รูปที่ 6.1 จำนวนกริดที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน ที่ $Re=19,673$



รูปที่ 6.2 จำนวนกริดที่ส่งผลต่อค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ย ที่ $Re=19,673$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า y^+ นั้น เมื่อปรับจำนวนกริดให้ละเอียดขึ้น ค่า y^+ มีแนวโน้มลดลง สำหรับกรณี 4, 5, 6 และ 7 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตอบ ดังนั้นจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณคือ 307,988 (กรณี 4) นอกจากนี้ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน การสร้างกริดเพื่อคำนวณการไหลในชั้นย่อยหนืด ค่า y^+ ควรต่ำกว่า 1 ดังนั้นค่า y^+ ที่ได้จากการตรวจสอบนี้เพียงพอที่จะทำให้ได้คำตอบที่มีความแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 ค่า y^+ ที่ได้จากการทดสอบ

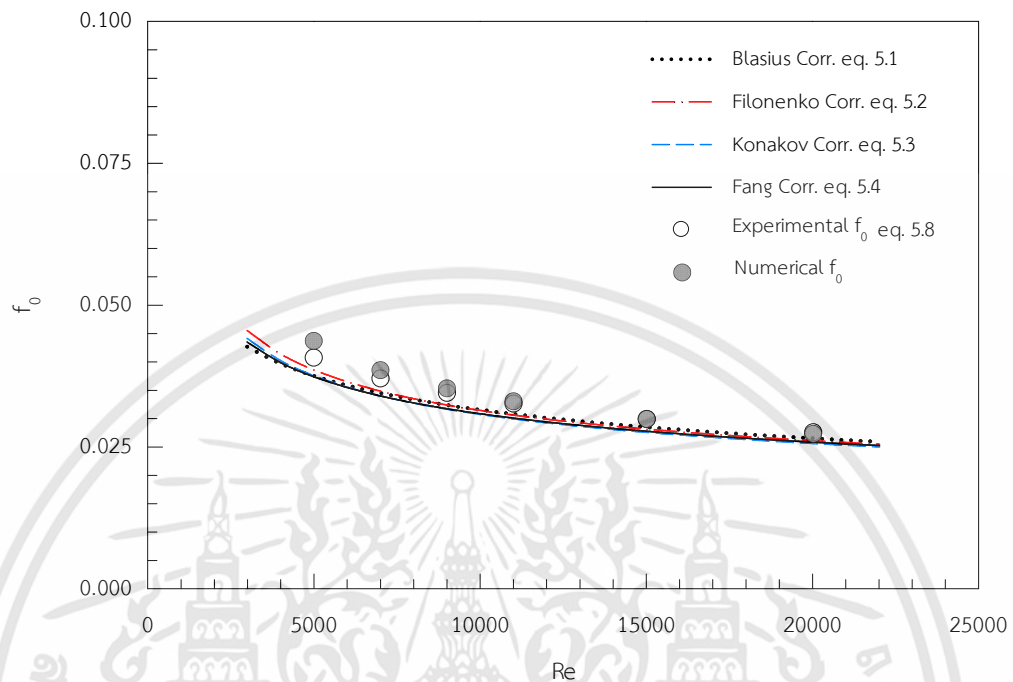
เนื้อหาส่วนถัดไปจะเป็นการทดสอบการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองในการใช้งานต่อไปสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งแหวนรูปตัววีภายในท่อกลม

6.2.2 ผลการตรวจสอบแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลในท่อกลมผิวเรียบ

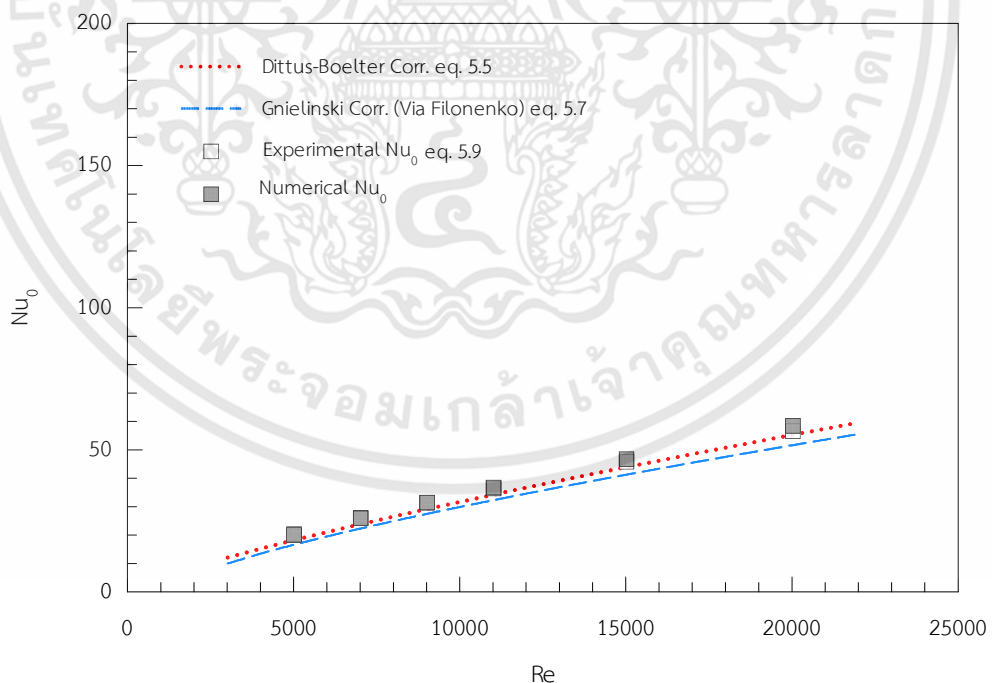
สำหรับการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลในท่อกลมผิวเรียบ ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ วิเคราะห์การไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5000-20,000 ผลการคำนวณค่าตัวประกอบเสียดทานของท่อกลมผิวเรียบหรือ f_0 ถูกนำมาเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Blasius, Filonenko, Konakov และ Fang et al. จากสมการที่ 5.1, 5.2, 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ ส่วนผลการคำนวณค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยสำหรับท่อกลมผิวเรียบหรือ Nu_0 ถูกนำมาเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และ Gnielinski ในสมการที่ 5.5 และ 5.7 สำหรับงานวิจัยนี้ การคำนวณค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยจากสหสัมพันธ์ของ Gnielinski ใช้ค่าตัวประกอบเสียดทานจากสหสัมพันธ์ของ Filonenko ในสมการที่ 5.2 นอกจากนี้ สหสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบเสียดทานและค่าเลขนัสเซลล์ต์เฉลี่ยจากผลการทดลองของ Chingtuaythong [2] ในสมการที่ 5.8 และ 5.9 ยังถูกนำมาเปรียบเทียบกับพร้อมกันกับผลการทดลองเชิงตัวเลข ดังแสดงในรูปที่ 6.4 และ 6.5 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การคำนวณเชิงตัวเลขมีแนวโน้มสอดคล้องกันอย่างดีกับสหสัมพันธ์และจากการทดลอง ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของค่าตัวประกอบเสียดทานตลอดช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา เท่ากับ 8.59%, 8.52%, 11.02%, 10.70% และ 1.08% เมื่อเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Blasius, Filonenko, Konakov, Fang et al. และจาก Chingtuaythong [2] ตามลำดับ ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยคือ 7.56%, 14.91% และ 0.35% เมื่อเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter, Gnielinski และจาก Chingtuaythong [2] ตามลำดับ



รูปที่ 6.4 ค่าตัวประกอบเสียดทานในท่อกลมผิวเรียบ



รูปที่ 6.5 ค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

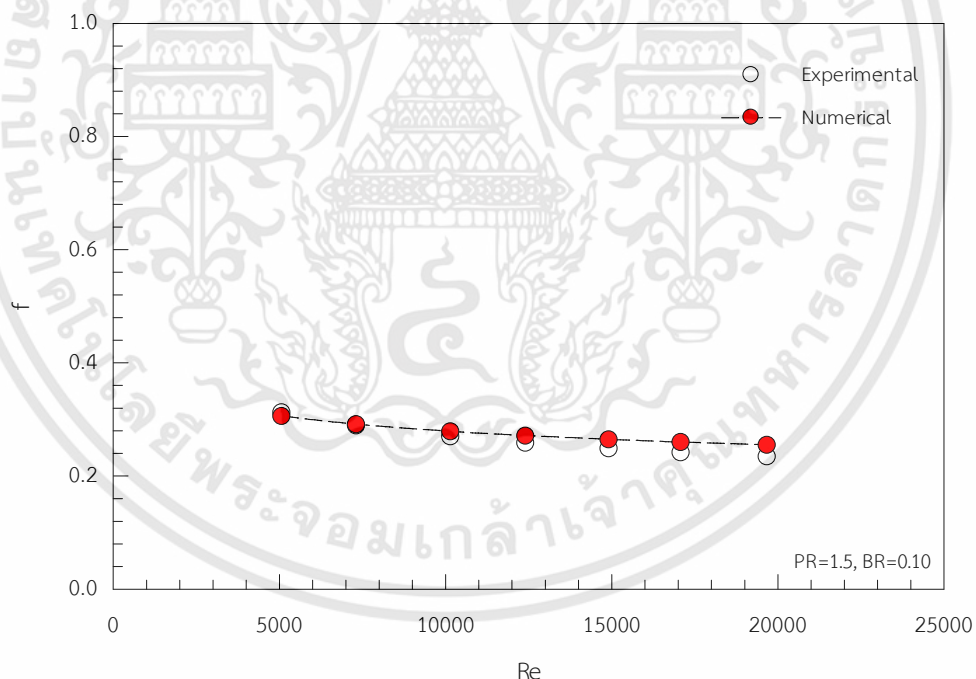
6.3 ผลการทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วนกับผลการทดลองการไหลผ่านแหวนรูปตัววี

เนื้อหาต่อไปนี้เป็น การทดสอบการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG $k-\epsilon$ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 5000-20,000 โดยการทดสอบการจำลองเชิงตัวเลขนี้ใช้ชุดข้อมูลผลการทดลองจาก Chingtuaythong [2] เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลองการไหลผ่านแหวนรูปตัววี ที่ $PR=1.5$ และ $BR=0.10$

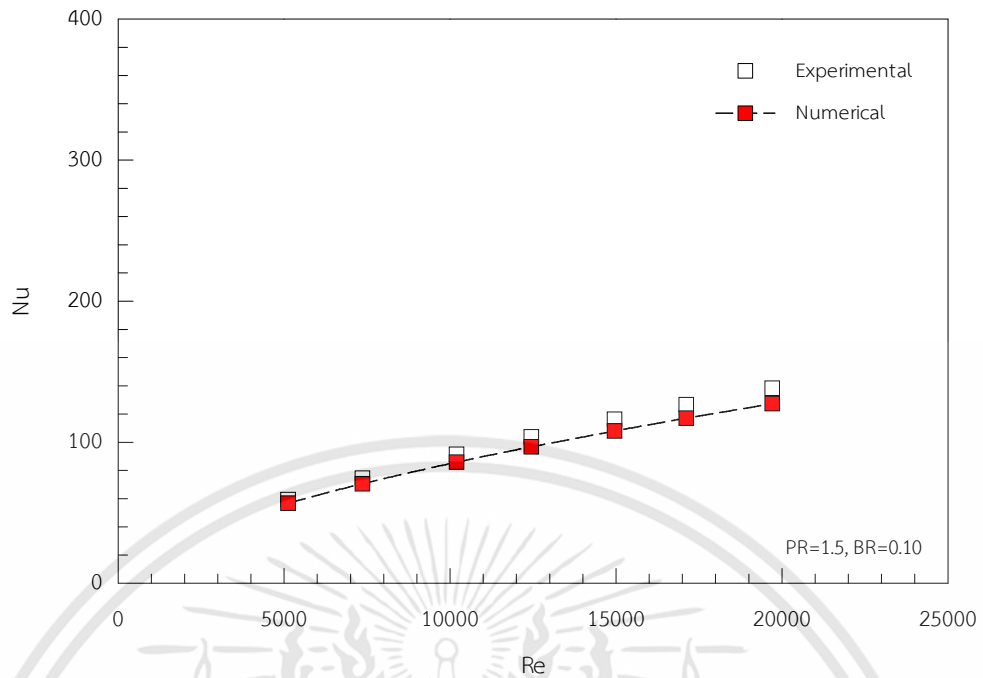
6.3.1 ผลการทดสอบค่าตัวประกอบเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนของแหวนรูปตัววี

รูปที่ 6.6 แสดงค่าตัวประกอบเสียดทาน จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่า ค่าตัวประกอบเสียดทานสอดคล้องกันดีมากกับผลการทดลอง ค่าความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณเชิงตัวเลขและผลการทดลองเท่ากับ 3.98% (S.D.=3.65)

การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณเชิงตัวเลขแสดงในรูปที่ 6.7 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขมีแนวโน้มสอดคล้องกันกับผลการทดลอง ค่าความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณเชิงตัวเลขและผลการทดลอง คือ 6.62% (S.D.=1.36)



รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณเชิงตัวเลข



รูปที่ 6.7 เปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณเชิงตัวเลข

หลังจากผ่านการตรวจสอบความเหมาะสมและการทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วนในบทนี้แล้ว เนื้อหาในบทที่ 7 เป็นการนำแบบจำลองไปใช้กับการกำหนดปัญหาที่สนใจในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่าง ๆ และเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของรูปร่างปัญหาเพื่อทดสอบสภาวะการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใส่แหวนรูปตัววีด้วยพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณประสิทธิภาพ

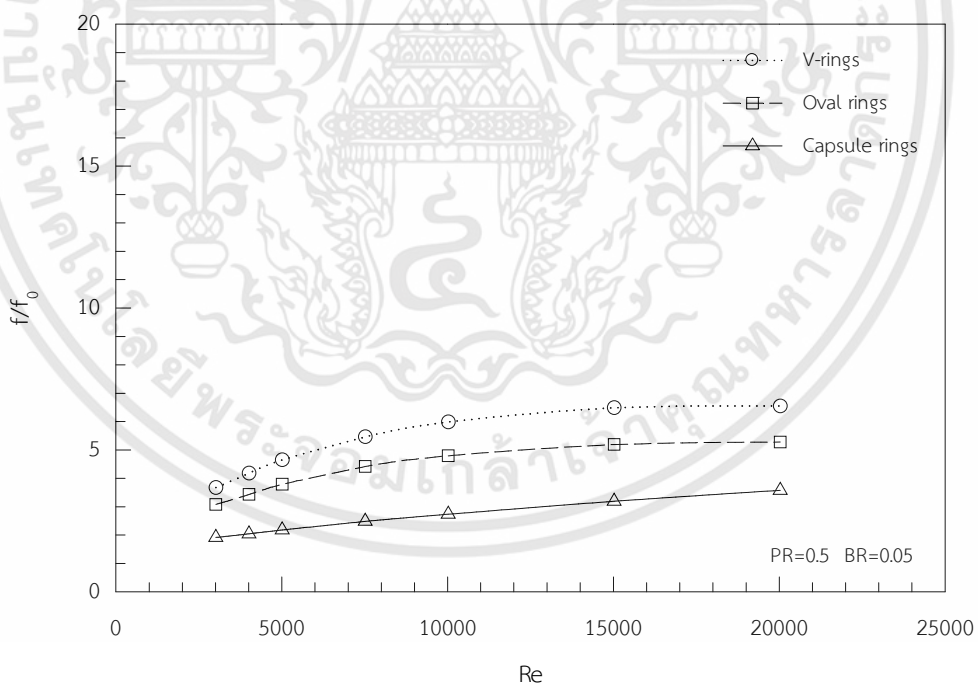
บทที่ 9

ขนาดของแหวนที่เหมาะสมและสหสัมพันธ์

เนื้อหาในบทนี้เป็นการแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี หลังจากนั้นเป็นการหาขนาดที่เหมาะสมของแหวนที่ให้ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด สุดท้ายเป็นการแสดงสหสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขของการไหลและพารามิเตอร์ของรูปร่างเพื่อใช้ทำนายตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน

9.1 ผลการทดสอบเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นการแสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววีต่อความดันลด การถ่ายเทความร้อน และสมรรถนะที่ถูกอธิบายอยู่ในรูปของอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทาน อัตราส่วนค่าเลขนัสเซลล์ และตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน ตามลำดับ

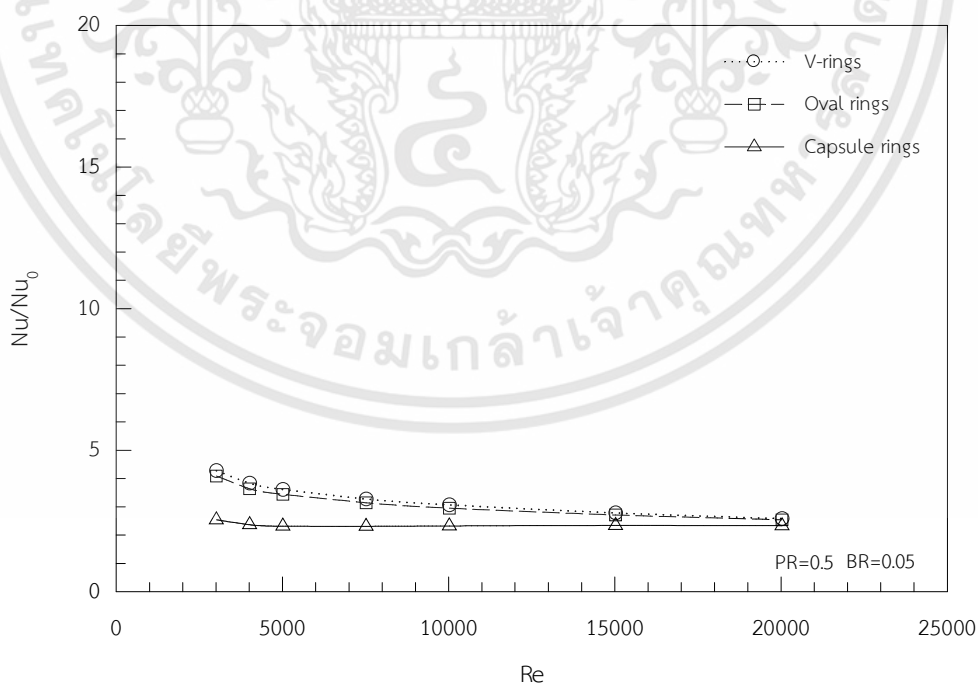


รูปที่ 9.1 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง f/f_0 ระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ PR=0.5, BR=0.05 และ $\alpha=30^\circ$

รูปที่ 9.1 แสดงค่า f/f_0 ที่ $PR=0.5$, $BR=0.05$ และ $\alpha=30^\circ$ ของแหวนทั้ง 3 แบบ แหวนที่มีค่า f/f_0 สูงที่สุดได้แก่แหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ สำหรับกรณีแหวนรูปตัววี ค่า f/f_0 ที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 3.67 ที่ $Re=3000$ ขณะที่ค่า f/f_0 ที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 6.55 ที่ $Re=20,000$ กรณีแหวนวงรีรูปตัววี ค่า f/f_0 ที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 3.08 ที่ $Re=3000$ ขณะที่ค่า f/f_0 ที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 5.28 ที่ $Re=20,000$ ส่วนกรณีแหวนแคปซูลรูปตัววี ค่า f/f_0 ที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.92 ที่ $Re=3000$ ขณะที่ค่า f/f_0 ที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 3.58 ที่ $Re=20,000$

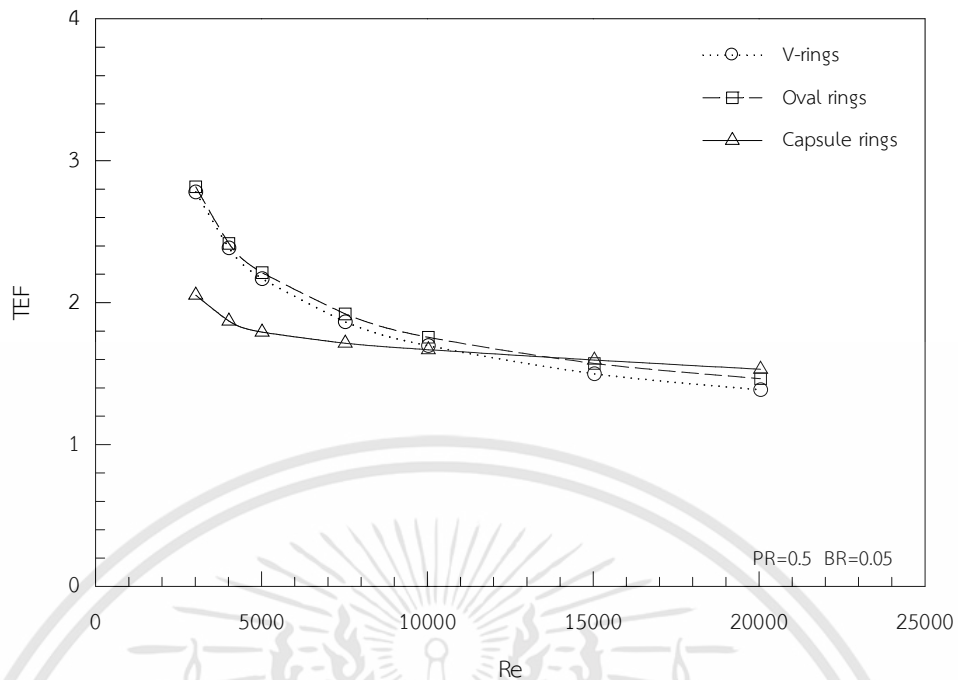
รูปที่ 9.2 แสดงค่า Nu/Nu_0 ที่ $PR=0.5$, $BR=0.05$ และ $\alpha=30^\circ$ ของแหวนทั้ง 3 แบบ แหวนที่มีค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดได้แก่แหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววีตามลำดับ สำหรับกรณีแหวนรูปตัววี ค่า Nu/Nu_0 ที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.59 ที่ $Re=20,000$ ขณะที่ค่า Nu/Nu_0 ที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 4.28 ที่ $Re=3000$ กรณีแหวนวงรีรูปตัววี ค่า Nu/Nu_0 ที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.55 ที่ $Re=20,000$ ขณะที่ค่า Nu/Nu_0 ที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 4.09 ที่ $Re=3000$ ส่วนกรณีแหวนแคปซูลรูปตัววี ค่า Nu/Nu_0 ที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.23 ที่ $Re=20,000$ ขณะที่ค่า Nu/Nu_0 ที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 2.35 ที่ $Re=3000$

รูปที่ 9.3 แสดงค่า TEF ที่ $PR=0.5$, $BR=0.05$ และ $\alpha=30^\circ$ ของแหวนทั้ง 3 แบบ โดยส่วนใหญ่ แหวนที่มีค่า TEF สูงที่สุดได้แก่แหวนวงรีรูปตัววี แหวนรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ ที่ $Re=3000$ ให้ค่า TEF สูงที่สุดโดย ค่า TEF สูงที่สุดเท่ากับ 2.81, 2.77 และ 2.05 สำหรับแหวนวงรีรูปตัววี แหวนรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววีตามลำดับ

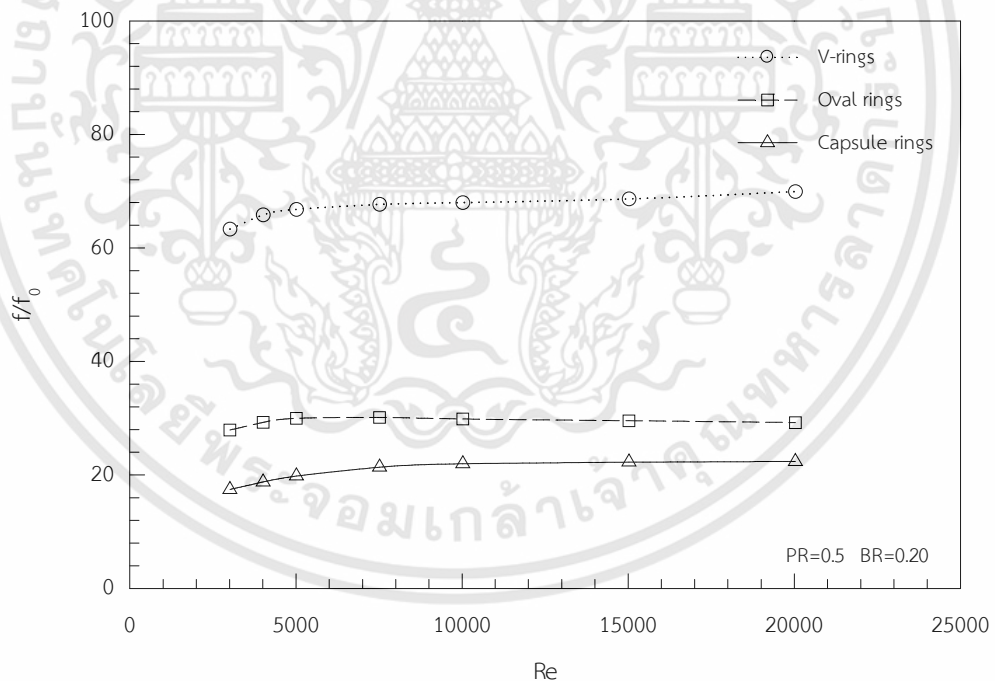


รูปที่ 9.2 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 ระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $PR=0.5$, $BR=0.05$ และ $\alpha=30^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



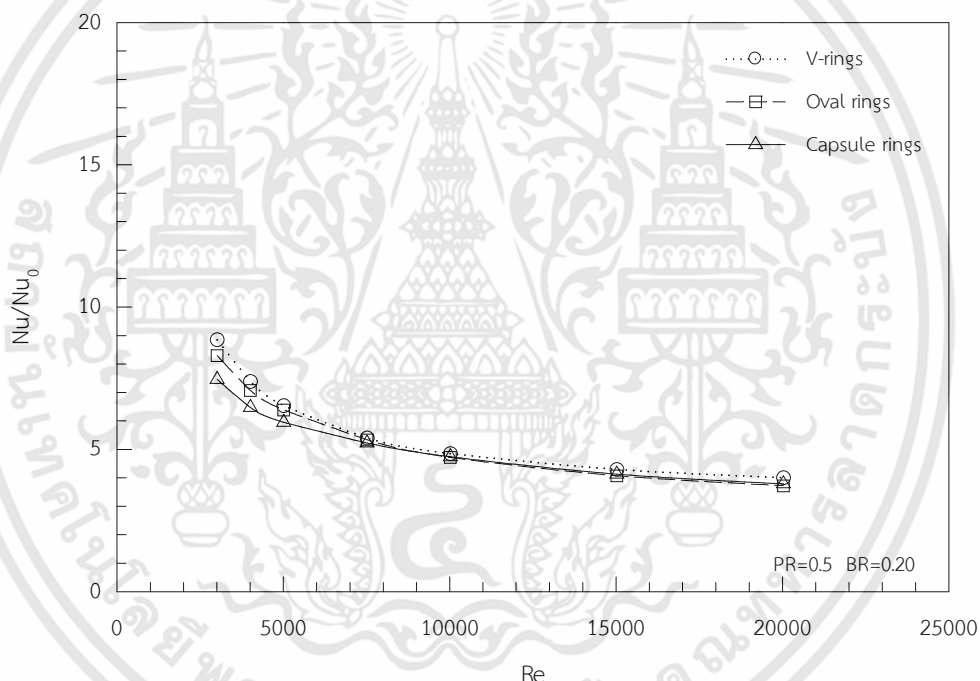
รูปที่ 9.3 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง TEF ระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ PR=0.5, BR=0.05 และ $\alpha=30^\circ$



รูปที่ 9.4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง f/f_0 ระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ PR=0.5, BR=0.20 และ $\alpha=30^\circ$

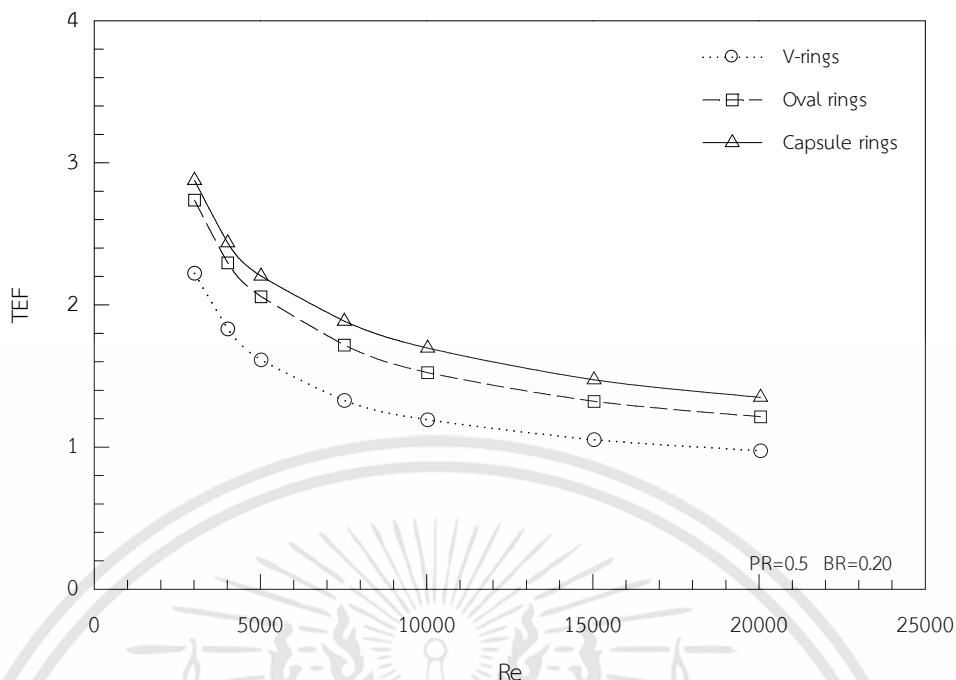
รูปที่ 9.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับค่า Re ที่ PR=0.5, BR=0.20 และ $\alpha=30^\circ$ แหวนที่มีค่า f/f_0 สูงที่สุดได้แก่แหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ สำหรับกรณีแหวนรูปตัววี ค่า f/f_0 ที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 63.44 ที่ Re=3000 ขณะที่ค่า f/f_0 สูงสุดเท่ากับเอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

70.02 ที่ $Re=20,000$ กรณีแหวนวงรีรูปตัววี ค่า f/f_0 ต่ำสุดเท่ากับ 28.10 ที่ $Re=3000$ ขณะที่ค่า f/f_0 ที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 29.40 ที่ $Re=20,000$ ส่วนกรณีแหวนแคปซูลรูปตัววี ค่า f/f_0 ที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 17.64 ที่ $Re=3000$ ขณะที่ค่า f/f_0 ที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 22.57 ที่ $Re=20,000$ เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 ที่ $PR=0.5$, $BR=0.20$ และ $\alpha=30^\circ$ แหวนที่มีค่า Nu/Nu_0 สูงที่สุดได้แก่แหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววีตามลำดับ ตามที่แสดงในรูปที่ 9.5 สำหรับกรณีแหวนรูปตัววี ค่า Nu/Nu_0 ต่ำสุดเท่ากับ 4.05 ที่ $Re=20,000$ ขณะที่ค่า Nu/Nu_0 ที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 8.89 ที่ $Re=3000$ กรณีแหวนวงรีรูปตัววี ค่า Nu/Nu_0 ที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 3.76 ที่ $Re=20,000$ ขณะที่ค่า Nu/Nu_0 ที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 8.34 ที่ $Re=3000$ ส่วนกรณีแหวนแคปซูลรูปตัววี ค่า Nu/Nu_0 ที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 3.83 ที่ $Re=20,000$ ขณะที่ค่า Nu/Nu_0 ที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 7.50 ที่ $Re=3000$



รูปที่ 9.5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 ระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ $PR=0.5$, $BR=0.20$ และ $\alpha=30^\circ$

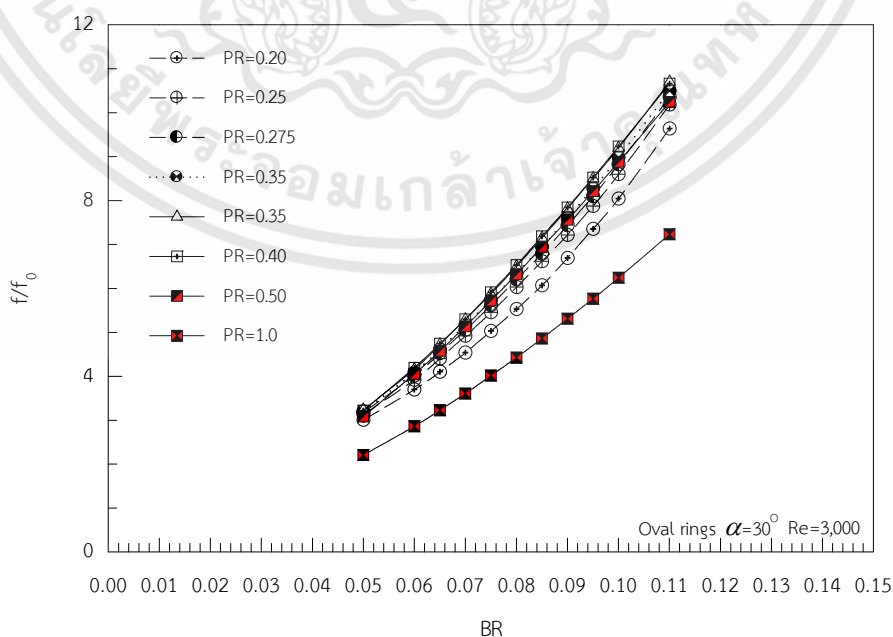
รูปที่ 9.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า TEF ของแหวนทั้ง 3 แบบ ที่ $PR=0.5$, $BR=0.20$ และ $\alpha=30^\circ$ จากรูป ที่ $Re=3000$ แหวนแคปซูลรูปตัววีให้ค่า TEF สูงที่สุดเท่ากับ 2.88 รองลงไปคือแหวนวงรีรูปตัววีและแหวนรูปตัววี เท่ากับ 2.74 และ 2.23 ตามลำดับ นั้นแสดงให้เห็นว่าที่ BR สูง ๆ การลดลงของ f/f_0 มีอิทธิพลมากกว่าการลดลงของ Nu/Nu_0 สำหรับแหวนแคปซูลรูปตัววีและแหวนวงรีรูปตัววี ค่า TEF ของแหวนทั้ง 2 แบบจึงสูงกว่าแหวนรูปตัววี



รูปที่ 9.6 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง TEF ระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี เมื่อเปลี่ยนแปลง Re ที่ PR=0.5, BR=0.20 และ $\alpha=30^\circ$

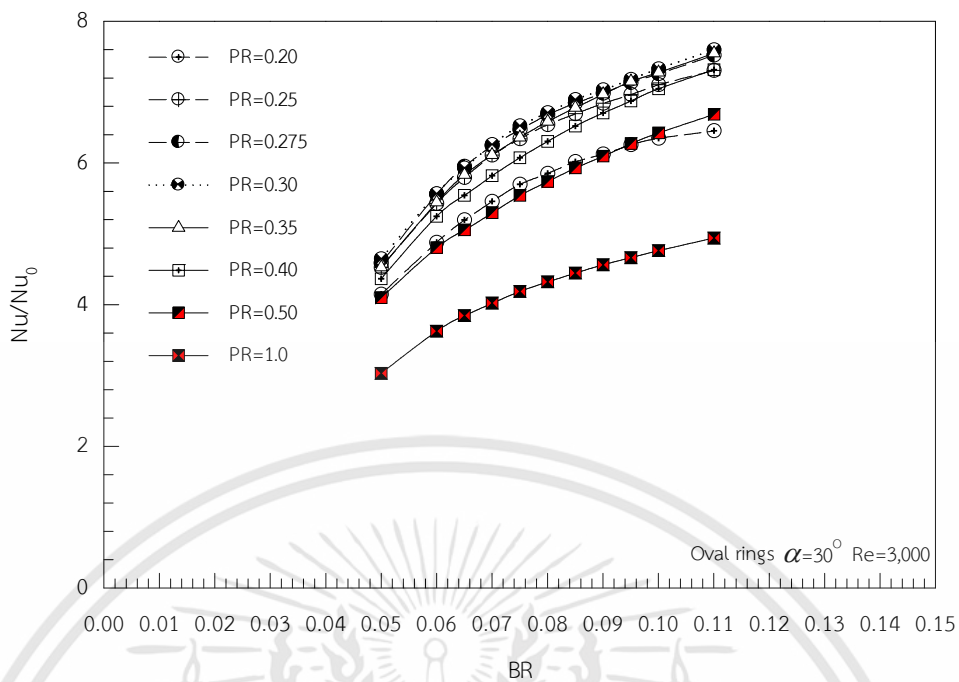
9.2 ขนาดและการจัดวางที่เหมาะสมของแหวนวงรีรูปตัววี

การหาขนาดที่เหมาะสมของแหวนวงรีรูปตัววีที่ $Re=3000$ เปลี่ยนแปลง PR จาก 0.2-1.0 และ BR จาก 0.05-0.11 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 , Nu/Nu_0 และ TEF แสดงอยู่ในรูปที่ 9.7, 9.8 และ 9.9 ค่า f/f_0 อยู่ในช่วง 2.21-10.69 ในขณะที่ Nu/Nu_0 มีค่าอยู่ในช่วง 3.03-7.59 และ TEF สูงสุดเท่ากับ 3.65 ที่ PR=0.275, BR=0.075 และ $Re=3000$

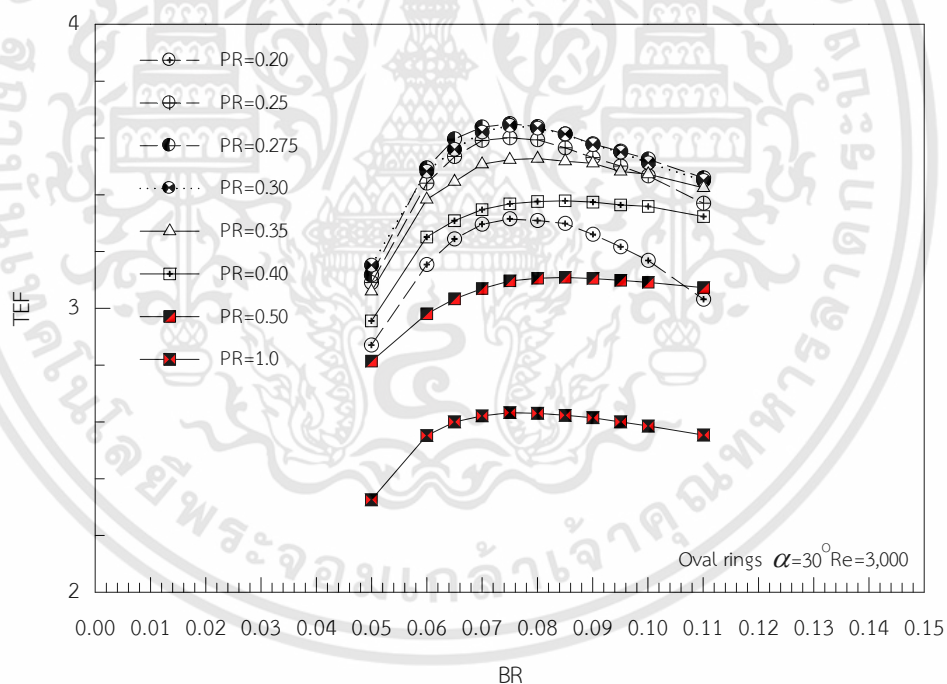


รูปที่ 9.7 การเปลี่ยนแปลง f/f_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $\alpha=30^\circ$ และ $Re=3000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.8 การเปลี่ยนแปลง Nu/Nu_0 กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $\alpha=30^\circ$ และ $Re=3000$



รูปที่ 9.9 การเปลี่ยนแปลง TEF กับ BR เมื่อเปลี่ยนแปลง PR ที่ $\alpha=30^\circ$ และ $Re=3000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.3 สหสัมพันธ์ของการไหล

สหสัมพันธ์ของ f , Nu และ TEF ที่พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของกับแหวนทั้ง 3 แบบ แสดงอยู่ในสมการที่ 9.1-9.9 โดยที่สหสัมพันธ์ของ Nu มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของแหวน 3 ตัว ได้แก่ PR , BR และ α นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับค่า Re และ Pr ด้วย ในขณะที่ค่า f และ TEF มีความสัมพันธ์กับทุกพารามิเตอร์ที่กล่าวมา ยกเว้นค่า Pr เท่านั้น ทุกสมการใช้ทำนายการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ $Pr=0.707$ ในช่วง $3000 \leq Re \leq 20,000$, $0.5 \leq PR \leq 2.0$, $0.05 \leq BR \leq 0.20$ และ $30^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ โดยที่แหวนทั้ง 3 แบบมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ ± 20 , ± 15 และ ± 15 สำหรับค่า f , Nu และ TEF ตามลำดับ สหสัมพันธ์ของแหวนทั้ง 3 แบบ เป็นดังต่อไปนี้

สำหรับกรณีแหวนรูปตัววี

$$f = 17.388 Re^{-0.0365} PR^{-0.649} BR^{2.037} (\tan \alpha + 1)^{2.772} \quad (9.1)$$

$$Nu = 0.934 Re^{0.613} Pr^{0.4} PR^{-0.272} BR^{0.459} (\tan \alpha + 1)^{0.499} \quad (9.2)$$

$$TEF = 20.967 Re^{-0.323} PR^{-0.056} BR^{-0.22} (\tan \alpha + 1)^{-0.425} \quad (9.3)$$

สำหรับกรณีแหวนวงรีรูปตัววี

$$f = 4.111 Re^{-0.0184} PR^{-0.614} BR^{1.461} (\tan \alpha + 1)^{1.877} \quad (9.4)$$

$$Nu = 0.753 Re^{0.627} Pr^{0.4} PR^{-0.308} BR^{0.379} (\tan \alpha + 1)^{0.191} \quad (9.5)$$

$$TEF = 28.07 Re^{-0.318} PR^{-0.099} BR^{-0.108} (\tan \alpha + 1)^{-0.435} \quad (9.6)$$

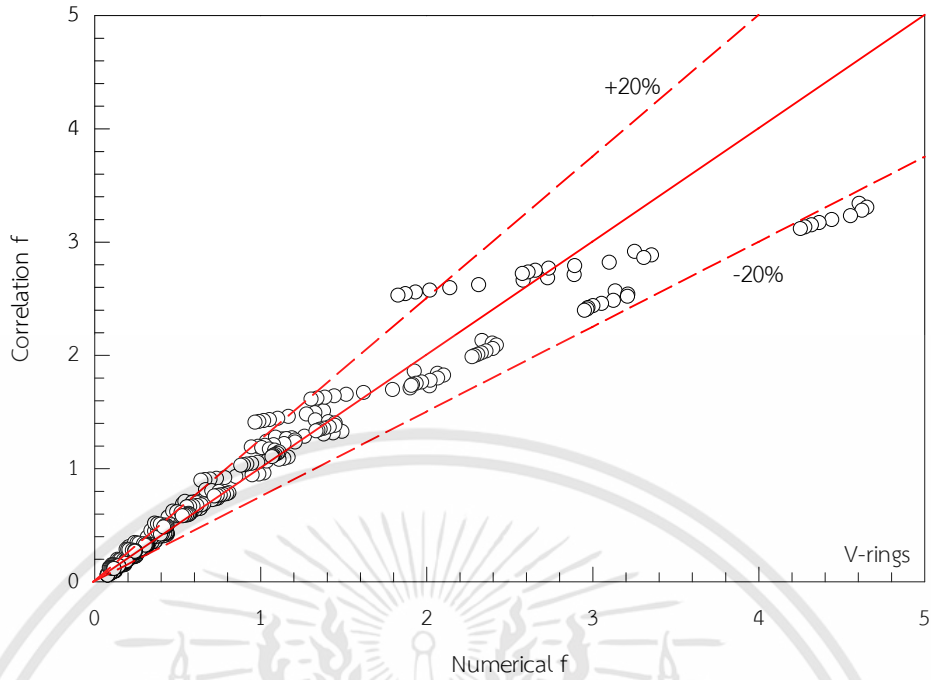
สำหรับกรณีแหวนแคปซูลรูปตัววี

$$f = 0.946 Re^{0.0593} PR^{-0.614} BR^{1.139} (\tan \alpha + 1)^{1.166} \quad (9.7)$$

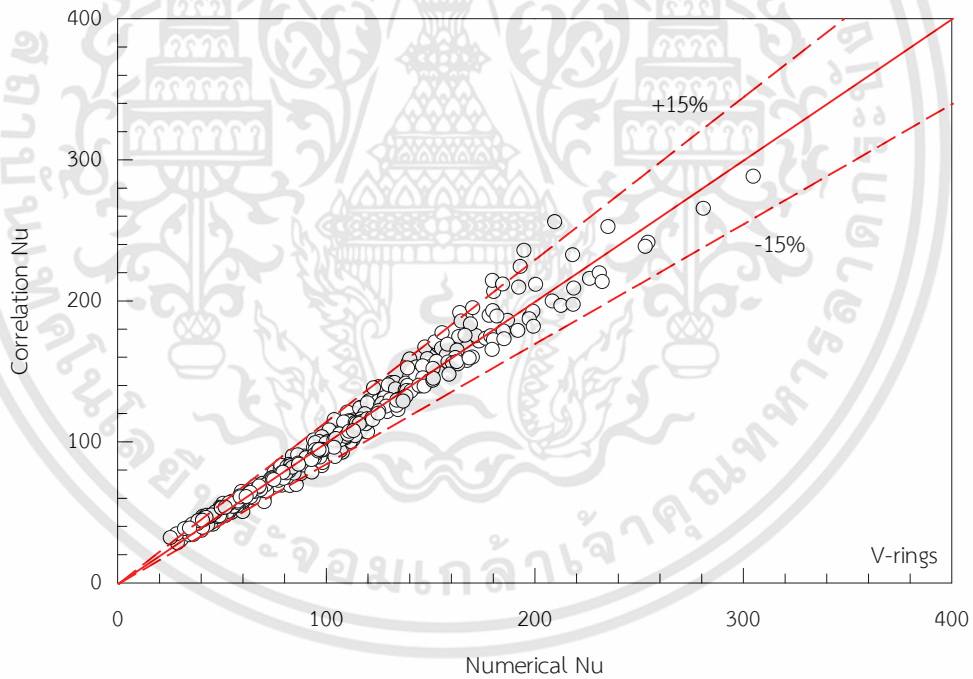
$$Nu = 0.405 Re^{0.684} Pr^{0.4} PR^{-0.316} BR^{0.335} (\tan \alpha + 1)^{-0.025} \quad (9.8)$$

$$TEF = 24.62 Re^{-0.287} PR^{-0.119} BR^{-0.045} (\tan \alpha + 1)^{-0.413} \quad (9.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

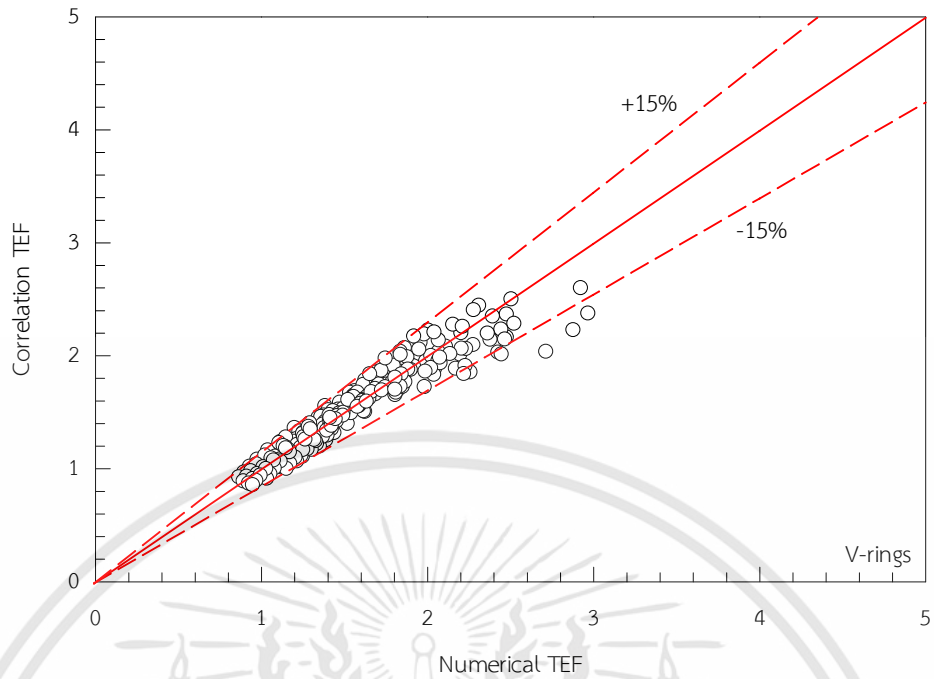


รูปที่ 9.10 ค่า f ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนรูปตัววี

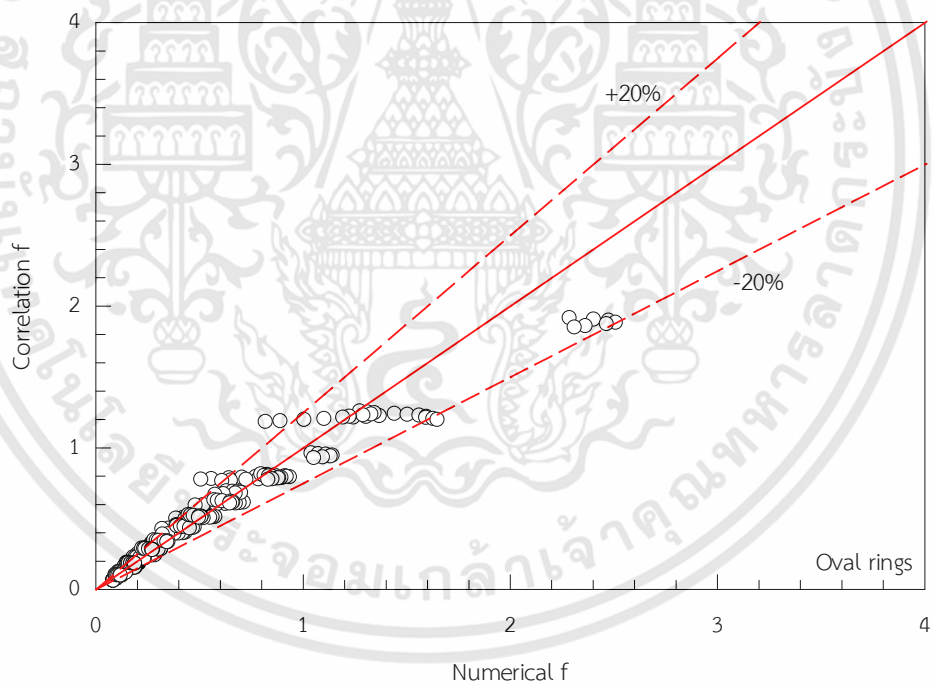


รูปที่ 9.11 ค่า Nu ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนรูปตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

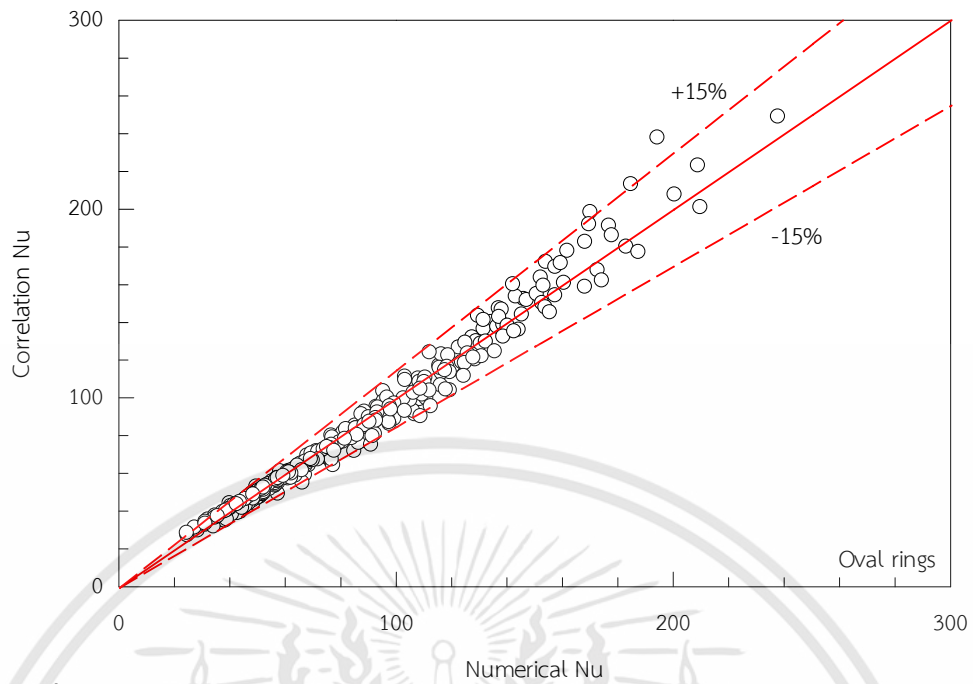


รูปที่ 9.12 ค่า TEF ระหว่างสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนรูปตัววี

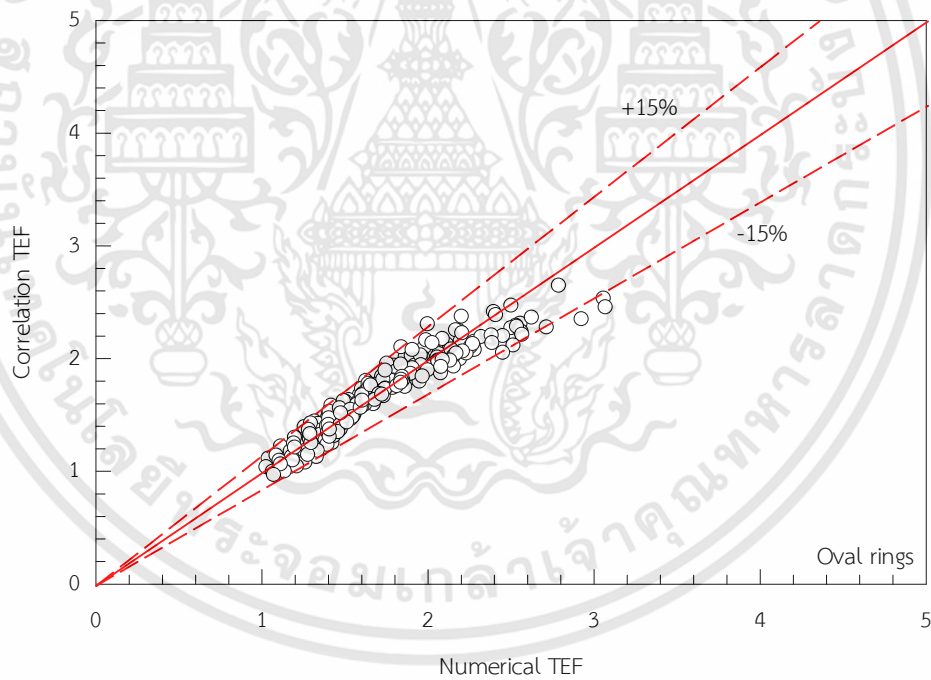


รูปที่ 9.13 ค่า f ระหว่างสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนวงรีรูปตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

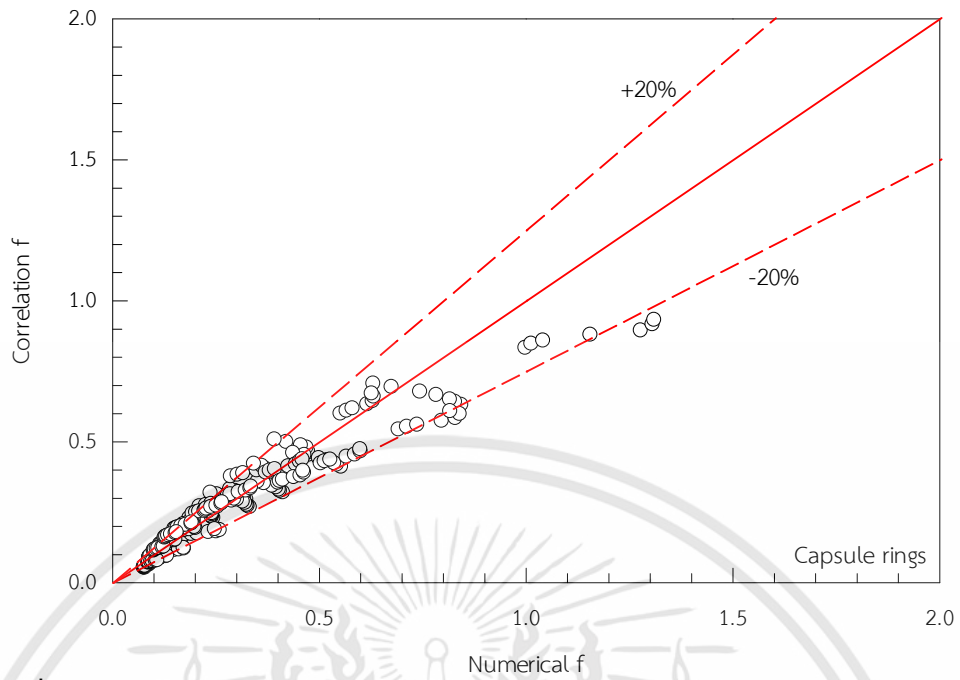


รูปที่ 9.14 ค่า Nu ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนวงรีรูปตัววี

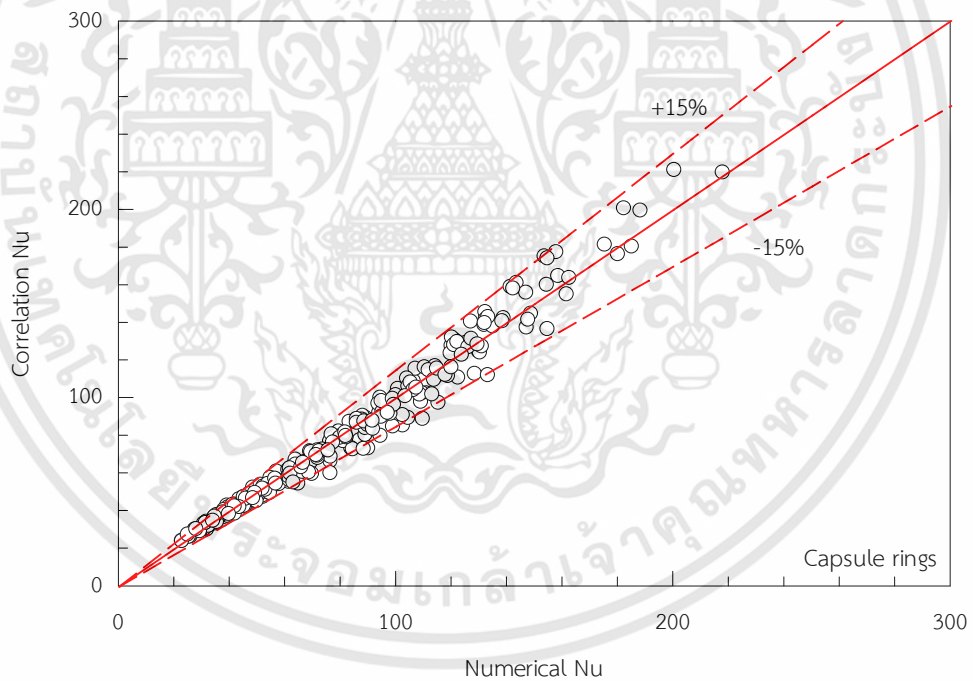


รูปที่ 9.15 ค่า TEF ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนวงรีรูปตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

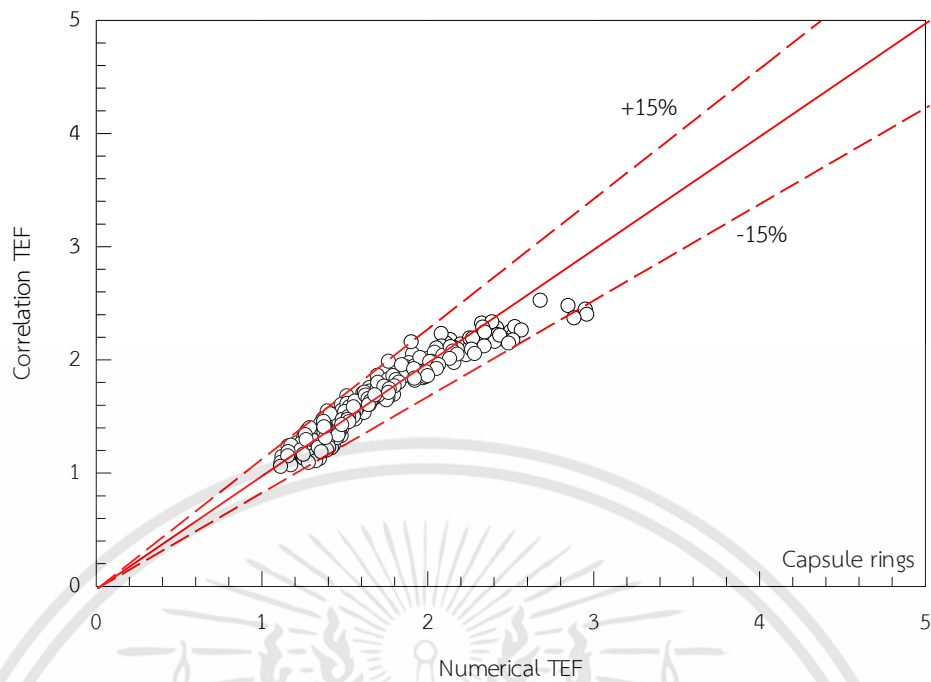


รูปที่ 9.16 ค่า f ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนแคปซูลรูปตัววี



รูปที่ 9.17 ค่า Nu ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนแคปซูลรูปตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.18 ค่า TEF ระหว่างสหสัมพันธ์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแหวนแคปซูลรูปตัววี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 10

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวสรุปผลการคำนวณเชิงตัวเลขและข้อเสนอแนะ จากการนำเสนอการวิเคราะห์การไหลในบทต่าง ๆ ที่ผ่านมา เช่น อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ลักษณะการจัดวางแหวน รวมถึงการปรับปรุงแหวนที่ส่งผลต่อค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน โดยวัตถุประสงค์ในการศึกษาวิจัยนี้ได้แก่

1. การศึกษาเชิงทดลองเพื่อศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อขนานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีและแผ่นกั้นรูปโค้งที่ถูกติดตั้งแบบชี้ทวนกระแสการไหล โดยมีการติดตั้งแผ่น TLC เพื่อดูการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว อัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง $Re=6000-22,000$

2. การศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลข 3 มิติสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัวที่จัดวางอย่างต่อเนื่องแบบชี้ทวนกระแสการไหลในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส อัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง $Re=3000-20,000$

3. การศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อทดสอบลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่ใส่แหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววีที่มีรูปร่าง ขนาด และการจัดวางที่ต่างกันเพื่อประเมินตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดของท่อกลม ในช่วงเลขเรย์โนลด์ $3000-20,000$

10.1 สรุปผลการวิจัย

10.1.1 การศึกษาเชิงทดลองของการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

1. ค่า f ที่ $PR=4.0, 6.0$ และ 8.0 มีค่าเท่ากับ $1.43, 1.34$ และ 1.25 เท่า ตามลำดับ เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ

2. ที่ $PR=8.0$ มีค่า Nu สูงสุดเมื่อเทียบกับที่ $PR=4.0$ และ 6.0

10.1.2 การศึกษาเชิงทดลองของการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปโค้งในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

1. การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่ม PR โดยมีการเพิ่มขึ้นเท่ากับ $116\%, 120\%$ และ 127% เทียบกับท่อผิวเรียบเมื่อ $PR=4, 6$ และ 8 ตามลำดับ

10.1.3 การศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแผ่นกั้นรูปตัววีลอยตัวในท่อจัตุรัส

1. ที่ $CR=0.0$ มีค่า f/f_0 ต่ำสุดเท่ากับ 10.3 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ ที่ $Re=3000$ กรณี $CR=0.20$ มีค่า f/f_0 สูงสุดเท่ากับ 21.5 เท่า ที่ $Re=20,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การจัดวางแผ่นกั้นที่ $CR=0, 0.05, 0.10, 0.15$ และ 0.20 ให้ค่า Nu/Nu_0 เท่ากับ 3.21, 3.34, 3.08, 3.00 และ 2.97 เท่า เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ โดยที่ $CR=0.05$ ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงสุด เท่ากับ 3.34

3. การจัดวางแผ่นกั้นที่ $CR=0, 0.05, 0.10, 0.15$ และ 0.20 ให้ค่า $TEF=1.48, 1.51, 1.36, 1.30,$ และ 1.27 ตามลำดับ โดยที่ $CR=0.05$ ให้ค่า TEF สูงสุดเท่ากับ 1.51

10.1.4 การทดสอบแบบจำลองเชิงตัวเลขของการไหลผ่านท่อกลมผิวเรียบและผลการทดลอง

1. ค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยของท่อกลมผิวเรียบหรือ f_0 เมื่อเปรียบเทียบกับ สหสัมพันธ์ของ Blasius, Filonenko, Konakov, Fang et al. และ Chingtuaythong [2] มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของ f_0 ในช่วง $Re= 5000-20,000$ เท่ากับ 8.59%, 8.52%, 11.02%, 10.70% และ 1.08% เมื่อเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Blasius, Filonenko, Konakov, Fang et al. และ จาก Chingtuaythong [2] ตามลำดับ

2. ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของค่าเลขนัสเซิลท์ของท่อกลมผิวเรียบหรือ Nu_0 เมื่อเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter, Gnielinski และ Chingtuaythong [2] มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของ Nu_0 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 3000-20,000 เท่ากับ 7.56%, 14.91% และ 0.35% เมื่อเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter, Gnielinski และ Chingtuaythong [2] ตามลำดับ

3. ผลการทดสอบแบบจำลองกับผลการทดลองการไหลผ่านแหวนรูปตัววี ที่ $PR=1.5$ $BR=0.10$ ในช่วง $Re= 5000-20,000$ พบว่า ค่า f มีความสอดคล้องกันดีมากกับผลการทดลองของ Chingtuaythong [2] ค่าความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณเชิงตัวเลขและผลการทดลอง เท่ากับ 3.98% ส่วนค่า Nu มีค่าความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณเชิงตัวเลขและผลการทดลองของ Chingtuaythong [2] เท่ากับ 6.62%

10.1.5 การศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวนในท่อกลม

1. จำนวนกริดที่เพียงพอสำหรับการทดสอบแบบจำลองเชิงตัวเลขของการไหลผ่านแหวนรูปตัววีในท่อกลมคือ 358,064 กริด

2. พารามิเตอร์ที่ทำให้ค่า f/f_0 มีแนวโน้มลดลงคือ PR โดยที่ $PR=0.5$ ให้ค่า f/f_0 สูงสุด ส่วนที่ $PR=2.0$ ให้ค่า f/f_0 ต่ำสุด (เหมือนกับกรณีของแหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี)

3. พารามิเตอร์ที่ทำให้ค่า f/f_0 มีแนวโน้มสูงขึ้นคือ Re, BR และ α โดยที่ $Re=3000$ มีค่า f/f_0 ต่ำสุด และสูงสุดที่ $Re=20,000$ ที่ $BR=0.05$ ให้ค่า f/f_0 ต่ำสุด และสูงสุดที่ $BR=0.20$ ที่ $\alpha=30^\circ$ ให้ค่า f/f_0 ต่ำสุด และสูงสุดที่ $\alpha= 45^\circ$ (เหมือนกับกรณีของแหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี)

4. พารามิเตอร์ที่ทำให้ค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงคือ Re และ PR โดยที่ $Re=3000$ มีค่า Nu/Nu_0 สูงสุด และต่ำสุดที่ $Re=20,000$ ที่ $PR=0.5$ ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงสุด ส่วนที่ $PR=2.0$ ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำสุด (เหมือนกับกรณีของแหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี)

5. พารามิเตอร์ที่ทำให้ค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นคือ BR และ α โดยที่ BR=0.05 มีค่า Nu/Nu_0 ต่ำสุด และสูงสุดที่ BR=0.20 ที่ $\alpha=30^\circ$ ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำสุด และสูงสุดที่ $\alpha=45^\circ$ (เหมือนกับกรณีของแหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี)

6. พารามิเตอร์ที่ทำให้ค่า TEF มีแนวโน้มลดลงคือ Re, PR และ α โดยที่ Re=3000 มีค่า TEF สูงสุด และต่ำสุดที่ Re=20,000 ที่ PR=0.5 ให้ค่า Nu/Nu_0 สูงสุด ส่วนที่ PR=2.0 ให้ค่า Nu/Nu_0 ต่ำสุด (เหมือนกับกรณีของแหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี)

7. กรณีแหวนรูปตัววี ที่ Re=3000 เมื่อค่า BR=0.05 จะให้ค่า TEF ค่าหนึ่ง และจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่ BR=0.075 หลังจากนั้นค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม BR ไปจนถึง 0.20 สำหรับที่ Re อื่น ค่า TEF สูงสุดอยู่ที่ BR=0.05 และต่ำสุดที่ BR=0.20

8. กรณีแหวนวงรีรูปตัววี ที่ Re=3000 เมื่อค่า BR=0.05 จะให้ค่า TEF ค่าหนึ่ง และจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่ BR=0.10 หลังจากนั้นค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม BR ไปจนถึง 0.20 สำหรับที่ Re อื่น ค่า TEF สูงสุดอยู่ที่ BR=0.05 และต่ำสุดที่ BR=0.20

9. กรณีแหวนแคปซูลรูปตัววี ที่ Re=3000 เมื่อค่า BR=0.05 จะให้ค่า TEF ค่าหนึ่ง และจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่ BR=0.15 หลังจากนั้นค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม BR ไปจนถึง 0.20 สำหรับที่ Re อื่น ค่า TEF สูงสุดอยู่ที่ BR=0.05 และต่ำสุดที่ BR=0.20

10. กรณีแหวนรูปตัววี ค่า f/f_0 ต่ำสุดเท่ากับ 1.84 ที่ Re=3000, PR=2.0, BR=0.05 และ $\alpha=30^\circ$ ส่วนค่า f/f_0 สูงสุดเท่ากับ 311.25 ที่ Re=20,000, PR=0.5, BR=0.20 และ $\alpha=45^\circ$ ค่า Nu/Nu_0 ต่ำสุดเท่ากับ 2.08 ที่ PR=2.0, BR=0.05, $\alpha=30^\circ$ และ Re=20,000 ค่า Nu/Nu_0 สูงสุดเท่ากับ 10.32 ที่ PR=0.5, BR=0.20, $\alpha=45^\circ$ และ Re=3000 ค่า TEF สูงสุดอยู่ที่ PR=0.5, BR=0.075 และ $\alpha=30^\circ$ เท่ากับ 2.97 เท่าเมื่อเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ

11. กรณีแหวนวงรีรูปตัววี ค่า f/f_0 ต่ำสุดเท่ากับ 1.75 ที่ Re=3000, PR=2.0, BR=0.05 และ $\alpha=30^\circ$ ส่วนค่า f/f_0 สูงสุดเท่ากับ 88.04 ที่ Re=20,000 PR=0.5, BR=0.20 และ $\alpha=45^\circ$ ค่า Nu/Nu_0 ต่ำสุดเท่ากับ 2.05 ที่ PR=2.0, BR=0.05, $\alpha=30^\circ$ และ Re=20,000 ค่า Nu/Nu_0 สูงสุดเท่ากับ 9.00 ที่ PR=0.5, BR=0.20, $\alpha=45^\circ$ และ Re=3000 ค่า TEF สูงสุดอยู่ที่ PR=0.5, BR=0.10, $\alpha=30^\circ$ เท่ากับ 3.06 เท่าเมื่อเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ

12. กรณีแหวนแคปซูลรูปตัววี ค่า f/f_0 ต่ำสุดเท่ากับ 1.65 ที่ Re=3000, PR=2.0, BR=0.05 และ $\alpha=30^\circ$ ส่วนค่า f/f_0 สูงสุดเท่ากับ 49.90 ที่ Re=20,000, PR=0.5, BR=0.20 และ $\alpha=45^\circ$ ค่า Nu/Nu_0 ต่ำสุดเท่ากับ 2.01 ที่ PR=2.0, BR=0.05, $\alpha=30^\circ$ และ Re=20,000 ค่า Nu/Nu_0 สูงสุดเท่ากับ 7.56 ที่ PR=0.5, BR=0.20, $\alpha=30^\circ$ และ Re=3000 ค่า TEF สูงสุดอยู่ที่ PR=0.5, BR=0.15 และ $\alpha=30^\circ$ เท่ากับ 2.94 เท่าเมื่อเทียบกับท่อกลมผิวเรียบ

13. เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี ที่ PR=0.5, BR=0.05 และ $\alpha=30^\circ$ ค่า f/f_0 ที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ Re=3000 มีค่าเท่ากับ 3.67, 3.08 และ 1.92

สำหรับแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ ในขณะที่ค่า f/f_0 ที่สูงสุด อยู่ที่ $Re=20,000$ มีค่าเท่ากับ 6.55, 5.28 และ 3.58 สำหรับแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ ค่า Nu/Nu_0 ที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ $Re=20,000$ มีค่าเท่ากับ 2.59, 2.55 และ 2.23 สำหรับแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ ในขณะที่ค่า Nu/Nu_0 ที่สูงสุดอยู่ที่ $Re=3000$ มีค่าเท่ากับ 4.28, 4.09 และ 2.35 สำหรับแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ ค่า TEF ที่สูงสุดอยู่ที่ $Re=3000$ มีค่าเท่ากับ 2.81, 2.77 และ 2.05 สำหรับแหวนวงรีรูปตัววี แหวนรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ

14. เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนแคปซูลรูปตัววี ที่ $PR=0.5$, $BR=0.20$ และ $\alpha=30^\circ$ ค่า f/f_0 ที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ $Re=3000$ มีค่าเท่ากับ 63.44, 28.10 และ 17.64 สำหรับแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ ในขณะที่ค่า f/f_0 ที่สูงสุดอยู่ที่ $Re=20,000$ มีค่าเท่ากับ 70.02, 29.40 และ 22.57 สำหรับแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ ค่า Nu/Nu_0 ที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ $Re=20,000$ มีค่าเท่ากับ 4.05, 3.76 และ 3.83 สำหรับแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ ในขณะที่ค่า Nu/Nu_0 ที่สูงสุดอยู่ที่ $Re=3000$ มีค่าเท่ากับ 8.89, 8.34 และ 7.50 สำหรับแหวนรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววีและแหวนแคปซูลรูปตัววี ตามลำดับ ค่า TEF ที่สูงสุดอยู่ที่ $Re=3000$ มีค่าเท่ากับ 2.88, 2.74 และ 2.23 สำหรับแหวนแคปซูลรูปตัววี แหวนวงรีรูปตัววี และแหวนรูปตัววี ตามลำดับ

15. การหาขนาดของแหวนที่เหมาะสมได้ทำกับแหวนวงรีรูปตัววีเนื่องจากมีค่า TEF สูงกว่าแหวนแบบอื่น โดยขนาดของแหวนที่เหมาะสมที่ให้ค่า TEF สูงสุดเท่ากับ 3.65 ที่ $PR=0.275$, $BR=0.075$, $\alpha=30^\circ$ และ $Re=3000$

10.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการไหลที่ไม่คงตัวสำหรับการไหลใน 3 มิติสำหรับการไหลผ่านแหวน ซึ่งจะช่วยให้สามารถแสดงพฤติกรรมหรือกลไกในการถ่ายเทความร้อนและโครงสร้างการไหลได้ดียิ่งขึ้น
2. ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนอื่นในการจำลองเชิงตัวเลข เช่น แบบจำลองการไหลปั่นป่วนขนาดใหญ่หรือการจำลองการหมุนวนขนาดใหญ่ เป็นต้น
3. การทดสอบเชิงตัวเลขที่ต้องนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับนั้น การวัดค่าต่าง ๆ ในการทดลองเป็นเรื่องสำคัญมาก ผู้ที่ศึกษาต้องมีการวางแผนการทดลองที่ดีในการได้มาซึ่งค่าการวัดที่ถูกต้อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hesselgreaves J. E. *Compact heat exchangers: Selection, Design and Operation*. 1st ED. New York : Pergamon. 2001.
- [2] Chingtuaythong W., Promvong P., Tianpong C. and Pimsarn M., "Heat transfer characterization in a tubular heat exchanger with V-shaped rings." *Applied Thermal Engineering.*, vol. 110, 2017. pp. 1164-1171
- [3] Tanda G. "Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs." *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, vol. 47, 2004. pp. 229-243
- [4] Tanda G. "Effect of rib spacing on heat transfer and friction in a rectangular channel with 45° angled rib turbulators on one/two walls." *Int. J. Heat Mass Transfer.*, vol. 54, 2011. pp. 1081-1090
- [5] Lee D. H., Rhee D. H., Kim K. M., Cho H. H. and Moon H. K. "Detailed measurement of heat/mass transfer with continuous and multiple V-shaped ribs in rectangular channel." *Energy.*, vol. 34, 2009. pp. 1770-1778
- [6] Promvong P., Kwankaomeng S. "Periodic laminar flow and heat transfer in a channel with 45° staggered V-baffles." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 37, 2010. pp. 841-849
- [7] Jedsadaratanachai W., Boonloi, A.. "Effects of blockage ratio and pitch ratio on thermal performance in a square channel with 30° double V-baffles." *Case Studies in Thermal Engineering.*, vol. 4, 2014. pp. 118-128
- [8] Promvong P., Sripattanapipat S. and Kwankaomeng A. "Laminar periodic flow and heat transfer in square channel with 45° inline baffles on two opposite walls." *International Journal of Thermal Sciences.*, vol. 49, 2010. pp. 963-975
- [9] Promvong P., Changcharoen W., Kwankaomeng S. and Thianpong C. "Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline V-shaped discrete ribs." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 38, 2011. pp. 1392-1399
- [10] Promvong P., Jedsadaratanachai W., Kwankaomeng S. and Thianpong C. "3D simulation of laminar flow and heat transfer in V-baffled square channel."

- International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 39, 2012.
pp. 85–93
- [11] Promvong P., Skullong S., Kwankaomeng S. and Thiangpong C., "Heat transfer in square duct fitted diagonally with angle-finned tape-part 2: numerical study." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 39, 2012.
pp. 625–633
- [12] Promvong P., Skullong S., Kwankaomeng S. and Thiangpong C., "Heat transfer in square duct fitted diagonally with angle-finned tape-part 1: experimental study." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 39, 2012. pp. 617–624
- [13] Olsson C. O., Sunden B., "Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels." *Experimental Thermal and Fluid Science.*, vol. 16, 1998. pp. 349-365
- [14] Ahn S. W. "The effects of roughness types on friction factors and heat transfer in roughened rectangular duct." *Int. Comm. Heat Mass Transfer.*, vol. 24, 2001. pp. 25-34
- [15] Gao X., Sunden B. "Heat transfer and pressure drop measurements in rib-roughened rectangular ducts." *Experimental Thermal and Fluids Science.*, vol. 24, 2001. pp. 25–34
- [16] Momin A. M. E., Saini J. S. and Solanki S. C. "Heat transfer and friction in solar air heater duct with V-shaped rib roughness on absorber plate." *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, vol. 45, 2002. pp. 3383–3396
- [17] Karwa R. "Studies of augmented heat transfer and friction in asymmetrically heated rectangular ducts with ribs on the heated wall in transverse, inclined, V-continuous and V-discrete pattern." *Int. Comm. Heat Mass Transfer.*, vol. 30, 2003. pp. 241-250
- [18] Kumar A., Bhagoria J. L. and Sarviya R. M. "Heat transfer and friction correlations for artificially roughened solar air heater duct with discrete W-shaped ribs." *Energy Conversion and Management.*, vol. 50, 2009. pp. 2106–2117
- [19] Lee D. H., Rhee D. H., Kim K. M., Cho H. H. and Moon H. K. "Detailed measurement of heat/mass transfer with continuous and multiple V-shaped ribs in rectangular channel." *Energy.* vol. 34, 2009. pp. 1770–1778

- [20] Sripattanapipat S., Promvong P. "Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 36, 2009. pp. 32–38
- [21] Promvong P. "Heat transfer and pressure drop in a channel with multiple 60° V-baffles." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 37, 2010. pp. 835–840
- [22] Hans V. S., Saini R. P. and Saini J. S. "Heat transfer and friction factor correlations for a solar air heater duct roughened artificially with multiple V-ribs." *Solar Energy.*, vol. 84, 2010. pp. 898–911
- [23] Lanjewar A., Bhagoria J. L. and Sarviya R. M. "Heat transfer and friction in solar air heater duct with W-shaped rib roughness on absorber plate." *Energy.*, vol. 36, 2011. pp. 4531–4541
- [24] Singh S., Chander S. and Saini J. S. "Heat transfer and friction factor correlations of solar air heater ducts artificially roughened with discrete V-down ribs." *Energy.*, vol. 36, 2011. pp. 5053-5064
- [25] Peng W., Jiang P. X., Wang Y. P. and Wei B. Y. "Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in channels with different types of ribs." *Applied Thermal Engineering.*, vol. 31, 2011. pp. 2702-2708
- [26] Alam T., Saini R. P. and Saini J. S. "Effect of circularity of perforation holes in V-shaped blockages on heat transfer and friction characteristics of rectangular solar air heater duct." *Energy Conversion and Management.*, vol. 86, 2014. pp. 952-963
- [27] Eiamsa-ard S., Promvong P. "Numerical study on heat transfer of turbulent channel flow over periodic grooves." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 35, 2008. pp. 844–852
- [28] Promvong P., Thianpong C. "Thermal performance assessment of turbulent channel flows over different shaped ribs." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 35, 2008. pp. 1327–1334
- [29] Eiamsa-ard S., Promvong P. "Thermal characteristics of turbulent rib-grooved channel flows." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 36, 2009. pp. 705–711

- [30] Thianpong C., Chompookham T., Skullong S. and Promvong P. "Thermal characterization of turbulent flow in a channel with isosceles triangular ribs." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 36, 2009. pp. 712–717
- [31] Promvong P., Chompookham T., Kwankaomeng S. and Thianpong C. "Enhanced heat transfer in a triangular ribbed channel with longitudinal vortex generators." *Energy Conversion and Management.*, vol. 51, 2010. pp. 1242–1249
- [32] Chompookham T., Thianpong C., Kwankaomeng S. and Promvong P. "Heat transfer augmentation in a Wedge-ribbed channel using winglet vortex generators." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 37, 2010. pp. 163–169
- [33] Promvong P., Khanoknaiyakarn C., Kwankaomeng S. and Thianpong C. "Thermal behavior in solar air heater channel fitted with combined rib and delta-winglet." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 38, 2011. pp. 749–756
- [34] Sriromreun P., Thianpong C. and Promvong P. "Experimental and numerical study on heat transfer enhancement in a channel with Z-shaped baffles." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 39, 2012. pp. 945–952
- [35] Chang S. W., Yang T. L. and Liou J. S. "Heat transfer and pressure drop in tube with broken twisted tape insert." *Experimental Thermal and Fluid Science.*, vol. 32, 2007. pp. 489–501
- [36] Chang S. W., Jan Y. J. and Liou J. S. "Turbulent heat transfer and pressure drop in tube Fitted with Serrated Twisted Tape." *International Journal of Thermal Sciences.*, vol. 46, 2007. pp. 506–518
- [37] Eiamsa-ard S., Thianpong C., Eiamsa-ard P. and Promvong P. "Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape Insert." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 36, 2009. pp 365–371
- [38] Eiamsa-ard S., Thianpong C., Eiamsa-ard P. and Promvong P. "Thermal characteristics in a heat exchanger tube fitted with dual twisted tape

- elements in tandem." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 37, 2010. pp. 39–46
- [39] Eiamsa-ard S., Promvong P. "Thermal characteristics in round tube fitted with serrated twisted tape." *Applied Thermal Engineering.*, vol. 30, 2010. pp. 1673–1680
- [40] Bas H., Ozceyhan V. "Heat transfer enhancement in a tube with twisted tape inserts placed separately from the tube Wall." *Experimental Thermal and Fluid Science.*, vol. 41, 2012. pp. 51–58
- [41] Eiamsa-arda S., Yongsiri K., Nanan K. and Thianpong C. "Heat transfer augmentation by helically twisted tapes as swirl and turbulence promoters." *Chemical Engineering and Processing.*, vol. 60, 2010. pp. 58–65
- [42] Bhuiya M. M. K., Chowdhury M. S. U., Saha M. and Islam M. T. "Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, 43, 2013. pp. 49–57
- [43] Garcia A., Vicente P. G. and Viedma A. "Experimental study of heat transfer enhancement with wire coil inserts in laminar-transition-turbulent regimes at different prandtl numbers." *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, vol. 48, 2005. pp. 4640–4651
- [44] Gunes S., Ozceyhan V. and Buyukalaca O. "Heat transfer enhancement in a tube with equilateral triangle cross sectioned coiled wire inserts." *Experimental Thermal and Fluid Science.*, vol. 34, 2010. pp. 684–691
- [45] Gunes S., Ozceyhan V. and Buyukalaca O. "The experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a tube with coiled wire inserts placed separately from the tube wall." *Applied Thermal Engineering.*, vol. 30, 2010. pp. 1719–1725
- [46] Promvong P. "Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators." *Energy Conversion and Management.*, vol. 49, 2008. pp. 2949–2955
- [47] Yakut K., Sahin B. and Canbazoglu S. "Performance and flow-induced vibration characteristics for conical-ring turbulators." *Applied Energy.*, vol. 79, 2004. pp. 65–76

- [48] Promvong P., Eiamsa-ard S. "Heat transfer and turbulent flow friction in a circular tube fitted with conical-nozzle turbulators." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 34, 2007. pp. 72–82
- [49] Kongkai-paiboon V., Nanan K. and Eiamsa-ard S. "Experimental investigation of heat transfer and turbulent flow friction in a tube fitted with perforated conical-rings." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 37, 2010. pp. 560–567
- [50] Eiamsa-ard S., Promvong P. "Experimental investigation of heat transfer and friction characteristics in a circular tube fitted with V-nozzle turbulators." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 33, 2006. pp. 591–600
- [51] Ozceyhan V., Gunes S., Buyukalaca O. and Altuntop N. "Heat transfer enhancement in a tube using circular cross sectional rings separated from wall." *Applied Energy.*, vol. 85, 2008. pp. 988–1001
- [52] Tandiroglu A. "Effect of flow geometry parameters on transient heat transfer for turbulent flow in a circular tube with baffle inserts." *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, vol. 49, 2006. pp. 1559–1569
- [53] Kongkai-paiboon V., Nanan K. and Eiamsa-ard S. "Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 37, 2010. pp. 568–574
- [54] Eiamsa-ard S., Pethkool S., Thianpong C. and Promvong P. "Turbulent flow heat transfer and pressure loss in a double pipe heat exchanger with louvered strip inserts." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 35, 2008. pp. 120–129
- [55] Eiamsa-ard S., Promvong P. "Thermal characterization of turbulent tube flows over diamond-shaped elements in tandem." *International Journal of Thermal Sciences.*, vol. 49, 2010. pp. 1051–1062
- [56] Eiamsa-ard S., Rattanawong S. and Promvong P. "Turbulent convection in round tube equipped with propeller type swirl generators." *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 36, 2009. pp. 357–364

- [57] Warren M. Rohsenow, James P. Hartnett and Yong I. Cho. *Handbook of Heat Transfer*. 3rd ED. New York : McGraw-Hill, Inc. 1998.
- [58] Joel H. Ferziger, Milovan Perić. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd ED. Berlin : Springer 2002. ISBN 3-540-42074-6.
- [59] FLUENT Incorporated. 2004. *FLUENT 6.3 User's Guide*. n.p.
- [60] Henk K. Versteeg, Weeratunge Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2nd ED. Essex : Pearson Education 2007.
- [61] David C. Wilcox. *Turbulence Modeling for CFD*. 2nd ED. La Cañada Flintridge : DCW Industries, Inc. 2002.
- [62] Yakhot V., Orszag S. A., Thangam S., Gatski T. B. and Speziale C. G. "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique." *Phys. Fluids A*, vol. 4, no. 7, 1992. pp. 1510-1520
- [63] Suhas V. Patankar. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York : McGraw-Hill, Inc. 1980.
- [64] Leonard B. P. "A Stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation." *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 19, 1979. pp. 59-98
- [65] จารุวัตร เจริญสุข. 2549. *พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ*. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [66] Patankar S. V., Spalding D. B. "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows." *Int. J. of Heat and Mass Transfer.*, vol. 15, 1972. pp. 1787-1806
- [67] Acharya S., Baliga B. R., Karki K., Murthy J. Y., Prakash C. and Vanka S. P. "Pressure-based Finite-volume methods in computational fluid dynamics." *Journal of Heat transfer.*, vol. 129, 2007. pp. 407-424
- [68] Anderson W. K., Bonhus D. L. "An implicit upwind algorithm for computing turbulent flows on unstructured grids." *Computers Fluids.*, vol. 23, no. 1, 1994. pp. 1-21
- [69] กীরติ สุกฤษณ์. 2553. *พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ*. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [70] Incropera F. P. et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th ED. Hoboken : John Wiley & Sons (Asia) 2007.

- [71] Ralph L. Webb, Nae-Hyun Kim. *Principles of Enhanced Heat Transfer*. 2nd ED. London : CRC Press 2005.
- [72] Máté Márton Lohász. "Large eddy simulation of heat transfer in ribbed ducts." Degree of Doctor of Philosophy. Faculty of Mechanical Engineering, Budapest University of Technology and Economics. 2008.
- [73] Moran M. J. et al. *Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat transfer*. 1st ED. USA : John Wiley & Sons, Inc. 2003.
- [74] Blasius PRH. "Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen." *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure.*, vol. 56, 1912. pp. 639-643
- [75] Filonenko G. K. "Hydraulischer Widerstand von Rohrleitungen." *Tepfoenergetika.*, vol. 1(4), 1954. pp. 40-44
- [76] Konakov P. K. "Eine neue Formel für den Reibungskoeffizienten glatter Rohre." *Berichte der Akademie der Wissenschaften der UdSSR.*, vol. L1(7), 1946. pp. 503-506
- [77] Dittus F. W., Boelter L. M. K., "Heat transfer in automobile radiators of the tubular type." *The University of California Publications on Engineering.*, vol. 2, 1930. pp. 443-461, Reprinted in *International Communications in Heat and Mass Transfer.*, vol. 12, 1985. pp. 3-22
- [78] Gnielinski V., "Neue Gleichungen für den Wärme- und Stoffaustausch in turbulent durchströmten Rohren und Kanälen, Forsch." *Forsch. Ing. Wes.*, vol. 41 (1), 1975. pp. 8-16, English Translation : "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow." *Int. Chem. Eng.*, vol. 16(2), 1976. pp. 359-368
- [79] Schlünder E. U. *Heat Exchanger Design Handbook-Single-Phase Convective Heat Transfer*. Washington : Hemisphere Publishing Corporation, 1983. pp. 2.5.1-5-2.5.1-6
- [80] Gnielinski V. "Ein neues Berechnungsverfahren für die Wärmeübertragung im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Rohrströmung." *Forschung im Ingenieurwesen.*, vol. 61, issue. 9, 1995. pp. 240-248
- [81] Gnielinski V. "On heat transfer in tubes." *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, vol. 63, 2013. pp. 134-140

- [82] Idelchik I. E. *Handbook of Hydraulic Resistance*. Jerusalem : S.monson, 1966.
- [83] Petukhov B. S., "Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties." *In Advances in Heat Transfer.*, Hartnett J. P., Irvine T. V. ED. New York : Academic Press, vol. 6, 1970. pp. 503–564
- [84] Taler D. "Determining velocity and friction factor for turbulent flow in smooth tubes." *International Journal of Thermal Sciences.*, vol. 105, 2016. pp. 109-122
- [85] Fang X., Xu Y. and Zhou Z. "New correlations of single-phase friction factor for turbulent pipe flow and evaluation of existing single-phase friction factor correlations." *Nuclear Energy and Design.*, vol. 241, 2011. pp. 897-902
- [86] Winterton R. H. S. "Where did the Dittus and Boelter equation come from?." *International Journal of Heat Mass Transfer.*, vol. 41, no. 4-5, 1998. pp. 809-810
- [87] Grassmann P. *Physical Principles of Chemical Engineering*. Oxford New York Toronto Sydney. Braunschweig : Pergamon Press 1971.
- [88] Gnielinski V. *VDI Heat Atlas*. 2nd ED. Heidelberg : Springer Verlag, 2010
- [89] Yunus A. Çengel. *Heat Transfer A Practical Approach*. 2nd ED. New York : McGraw-Hill 2002.
- [90] Moody L. "Friction factors for pipe flow." *Transactions of the ASME.*, vol. 66, 1944. pp. 671–684



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วารสารระดับนานาชาติ

- [1] Kaewkohkiat Y., Promvong P., Eiamsa-ard S. “Turbulent Periodic Flow and Heat Transfer in a Rectangular Channel with Detached V-Baffles” *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 26, no. 4, 2017. pp. 542-552
- [2] Koolnapadol N., Kaewkohkiat Y., Promvong P., and Eiamsa-ard S. “Thermal Behaviors in a Solar Air Heater Channel with Arc-Shaped Baffle Turbulators” *Advanced Materials Research*, vol. 1051, 2014. pp. 845-849

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- [1] Kaewkhokiat Y., Jedsadaratanachai W., Eiamsa-ard P., Promvong P., and Eiamsa-ard S. “Thermal Characteristics in Turbulent Channel Flows with V-Baffle Vortex Generators” *2014 International Conference and Utility Exhibition (ICUE) on Green Energy for Sustainable Development*, Pattaya City, Thailand, 19-21 March, 2014.
- [2] Kaewkhokiat Y., Tamna S., Pairoj W., and Promvong P. “Numerical Heat Transfer Study in a Round Tube with 60° V-Shaped Rings” *7th International Conference on Environment and Industrial Innovation, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 67, 2017.

Turbulent Periodic Flow and Heat Transfer in a Rectangular Channel with Detached V-Baffles

Y. Kaewkohkiat^{1*}, P. Promvonge^{1**}, and S. Eiamsa-ard^{2***}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, 10530 Thailand

Received September 8, 2015

Abstract—This paper presents a numerical analysis of turbulent periodic flow and heat transfer in a rectangular channel with detached V-baffles. The computations are based on the finite volume method with the SIMPLE algorithm for handling the pressure–velocity coupling and using the QUICK scheme for the convection terms. Air is used as the test fluid with the air flow rate in terms of Reynolds numbers ranging from 3000 to 20,000. The effects of different detached–clearance ratios (c/H , CR) of 0.0, 0.05, 0.1, 0.15, and 0.2, baffles–pitch to square channel–diameter ratio (pitch ratio (p/H), PR) is 1.0, baffles–height to square channel–diameter ratio (blockage ratio (b/H), BR) is 0.10, and attack angle (α) is 45° on heat transfer, friction factor and thermal enhancement factor are investigated numerically. It is found that a pair of counter–rotating vortices (P–vortex) caused by the baffles can induce impingement/attachment flows repeatedly on the rectangular channel walls leading to a greater increase in the heat transfer over the test channel. The maximum thermal performance and heat transfer are found to be about 1.5 and 3.3, respectively for CR = 0.05 and Re = 3000, while the highest pressure loss is about 21.5 in the case of CR = 0.2 and Re = 20,000.

DOI: 10.1134/S1810232817040099

1. INTRODUCTION

For decades, many engineering techniques have been devised for improving convective heat transfer rate from wall surfaces leading to the compact heat exchanger and increasing heat transfer efficiency. The cooling or heating fluid is supplied into ducts mostly mounted with several baffles to increase the degree of cooling or heating levels. This configuration is often used in the design of heat exchangers. Therefore, baffles spacing, angle of attack and height are among the most important parameters in the design of duct heat exchangers.

The concept of periodically fully developed flow was first introduced by Patankar et al. [1] to numerically investigate the heat transfer and flow characteristics in a duct. Since then, the periodically fully developed flow condition has been widely used to study thermal characteristics in staggered transverse-baffled channels with different baffles heights and pitch spacing lengths [2, 3]. A numerical investigation of laminar forced convection in a three-dimensional channel with baffles for periodically fully developed flow and with a uniform heat flux in the top and bottom walls was conducted by Lopez et al. [4]. Sripattanapipat and Promvonge [5] numerically studied the laminar periodic flow and thermal behaviors in a two dimensional channel fitted with staggered diamond-shaped baffles and found that the diamond baffles with half apex angle of 5° – 10° performs slightly better than the flat baffles.

Promvonge et al. [6] also examined numerically the laminar heat transfer in a square channel with 45° angled baffles placed on one wall and reported that a single streamwise vortex flow occurs and induces impingement jets on the wall of the inter-baffles cavity and the BTE sidewall. Again, Promvonge et al.

*E-mail: yingyongk@hotmail.com

**E-mail: kppongje@kmitl.ac.th

***E-mail: smith@mut.ac.th

Thermal Behaviors in a Solar Air Heater Channel with Arc-Shaped Baffle Turbulators

Narin Koolnapadol^{1, a *}, Yingyong Kaewkohkiat^{2, b}, Pongjet Promvonge^{2, c}
 and Smith Eiamsa-ard^{3, d}

¹ Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Chachoengsao, Thailand

² Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

³ Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand

^a narin2006@gmail.com, ^b yingyongk@hotmail.com, ^c kppongje@kmitl.ac.th, ^d smith@mut.ac.th

*Corresponding author

Keywords: Thermal, Baffle, Heat transfer, Channel, Turbulator.

Abstract. Influences of arc-shaped baffles turbulators (ASB) on thermal behaviors in a solar air heater channel are studied. In the experiment, the ASB with three pitch ratios (P/e) are placed on the absorber plate (bottom channel wall in this case) to generate stronger turbulence intensity in the channel. The distributions of temperature and local Nusselt number contours in the absorber plate fitted with ASB are observed with thermochromic liquid crystal (TLC) sheet. The results reveal that the heat transfer increases with the decrease in P/e due to longitudinal vortex flow effect. The heat transfer from employing the ASB at P/e = 4.0, 6.0 and 8.0 is higher than the smooth channel around 116%, 120% and 127%, respectively. This indicates that the ASB pitch spacing is optimal at 8 times baffle height in the present work.

Introduction

The heat transfer enhancement technology has received a strong attention over the past decades. The thermal improvement is popular owing to the related technical problems associated with energy conservation and structural design in many engineering applications, such as solar air/water heater, electronic cooling and heat exchanger systems, etc. Huang et al. [1] studied the local heat transfer coefficients in a square channel with a perforation baffle by using the transient liquid crystal thermography at different Reynolds numbers, baffle heights, and number of holes. Ary et al. [2] examined the flow patterns and heat transfer in the rectangular channel with inclined perforated baffles. Sriromreun et al. [3] performed the heat transfer in a rectangular channel with Z-shaped baffles at different channel-height ratios and pitch ratios. Caliskan [4] investigated the heat transfer and flow behaviors under impingement of a multiple circular jet array with perforated rib surfaces and solid rib surfaces using an infrared thermal imaging technique and a Laser-Doppler Anemometry. Yongsiri et al. [5] conducted the heat transfer in a channel with inclined detached-ribs at different attack angles. Moon et al. [6] reported the heat transfer and friction loss of rib-roughened rectangular cooling channels having a variety of cross-sectional rib shapes (square, isosceles triangular, fan-shaped, house-shaped, reverse cut-trapezoidal, cut-trapezoidal, reverse boot-shaped, boot-shaped, reverse right-angle triangular, right-angle triangular, reverse pentagonal, pentagonal, reverse right-angle trapezoidal, right-angle trapezoidal, isosceles trapezoidal, and semicircular ribs). Many investigations were focused on the influence of transverse rib/baffle turbulators on thermal characteristics. In this paper, the influence of arc-shaped baffles placed on a channel at different pitch ratios and Reynolds number has been studied. The objective of the present study is to investigate the effect of the arc-shaped baffles on heat transfer augmentation in the channel by using enhancement devices as mentioned above to generate the flow desired. The thermochromic liquid crystal (TLC) sheets were utilized to visualize the thermal distribution in a channel wall fitted with arc-shaped baffle turbulators using air as the test fluid.

Thermal Characteristics in Turbulent Channel Flows with V-Baffle Vortex Generators

Y. Kaewkohkiat, W. Jedsadaratanachai, P. Eiamsa-ard, P. Promvonge and S. Eiamsa-ard

Abstract--Experimental work has been performed to examine the effects of V-baffle vortex generators on the heat transfer and friction characteristics in a channel under a constant heat flux boundary condition. In the experiments, V-baffles at different pitch ratios ($PR=Pe = 4.0, 6.0$ and 8.0) were carried out. Measurements were carried out for a channel of one aspect ratio, $AR = W/H = 4.0$ and duct height, $H = 40$ mm with baffle height, $e = 8$ mm. Experiments were conducted for the Reynolds number range of 6000 to 22,000. The distributions of temperature and local Nusselt number on bottom channel wall were observed with thermochromic liquid crystal (TLC) sheet. Isothermal friction factors were also taken and presented. The obtained results demonstrate that heat transfer increases with the increase of Reynolds number, whereas friction factor (f) shows the opposite trend. Experimental results also show that the channels with V-baffle at the highest pitch ratio ($PR = 8.0$) provide highest heat transfer than others.

Index Terms-- Heat transfer, baffle, channel, thermochromic liquid crystal

I. INTRODUCTION

HEAT exchangers have been widely employed in several industrial and engineering applications. Techniques for enhancing heat transfer are relevant to several engineering applications. In recent years, the high cost of energy and material has resulted in an increased effort aimed at producing more efficient heat exchange equipment. The heat transfer rate can be improved by introducing a disturbance in the fluid flow (breaking the viscous and thermal boundary layers), but in the process, pumping power may increase significantly and ultimately the pumping cost becomes high. In the cooling channel, rib, fin or baffle vortex generators are often

employed in order to increase the convective heat transfer rate. For decades, baffle vortex generators have been applied in high-performance thermal systems due to their high thermal loads. The use of baffle vortex generators completely results in the change of the flow field and hence the variation of the local convective heat transfer coefficient. The presence of a transverse baffle assists to induce the main stream separation first, and to generate a recirculation zone ahead of it and then reattachment over the baffle itself. A further separation occurring after the baffle and creating a second recirculation zone behind the baffle is followed by another reattachment at the channel wall. If several baffles exist and their pitch is sufficiently larger than the baffle height, these flow patterns will reoccur along the channel wall. The use of baffles increases not only the heat transfer rate both for the increased turbulence degree and for the effects caused by reattachment but also substantial the pressure loss. The baffle geometry and arrangement in the channel alter the flow field resulting in different the convective heat transfer distribution. In particular, the angled baffles, the baffle cross-section, the baffle-to-channel height ratio and the baffle pitch-to-height ratio are all parameters that influence both the convective heat transfer coefficient and the overall thermal performance. Chaube *et al.* [1] investigated the flow and heat transfer characteristics of a two dimensional rib roughened (rectangular/chamfered rib) rectangular duct with only one principal wall subjected to uniform heat flux. Han *et al.* [2] conducted extensive experiments on the developing and fully developed turbulent flow, heat transfer and friction characteristics of square and rectangular ducts with rib turbulators on two opposite walls. Okamoto and Nakaso [3] found that turbulent fluctuations were greatest for a pitch-to-height ratio of 9 while the reattachment was seen to occur at the bottom between the ribs with the pitch-to-height ratio over 6.6. Lorenz *et al.* [4] presented the heat transfer coefficient distributions along the wall inside an asymmetrically ribbed channel measured for thermally developing and turbulent flow over periodic grooves. Martin and Bates [5] carried out the velocity field and turbulence structure in an asymmetrically ribbed rectangular duct at several rectangular duct heights. Layek *et al.* [6] reported the heat transfer rate and friction factor in rectangular ducts with repeated transverse integral chamfered rib-grooved roughness on one broad wall at various groove position to pitch ratios. Dalle Donne and Meyer [7] presented a new transformation method to obtain data applicable to reactor fuel elements for ten rods, each with

The authors would like to acknowledge with appreciation, the Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy, Thailand (EPPO) for financial support of this research.

Y. Kaewkohkiat is with the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

W. Jedsadaratanachai is with the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

P. Eiamsa-ard is with the Faculty of Industrial Technology, Phetchaburi Rajabhat University, Phetchaburi 76000, Thailand

P. Promvonge is with the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

S. Eiamsa-ard is with the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok 10530, Thailand (e-mail: smith@mut.ac.th).

Numerical heat transfer study in a round tube with 60° V-shaped rings

Y Kaewkohkiat¹, S Tamna², W Pairoj¹ and P Promvonge¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Applied Mathematics and Mechanics Research Laboratory (AMM) Department of Automotive Engineering, Faculty of Engineering, TNI Bangkok, Thailand
Email: kpongjet@gmail.com

Abstract. Turbulent flow and heat transfer behaviors in a 3-dimensional isothermal tube mounted repeatedly with 60° V-shaped rings (V-rings) are numerically investigated. The computation based on the finite volume method was conducted for the airflow rate in terms of Reynolds number (Re) in the range of 4000 to 20,000. The ring parameters include three flow blockage ratios, (BR=e/D=0.1, 0.15 and 0.2) and a single ring pitch ratio, PR=1. The computed result shows that friction factor and Nusselt number (Nu) increase with the increment in BR and the maximum thermal enhancement factor (η) of about 1.73 with Nu/Nu₀ = 4.5 is found at BR=0.1 and Re=4000. For the need of maximum heat transfer enhancement (Nu/Nu₀), the case of BR=0.2 V-ring is selected and modified since this case provides the highest heat transfer. The modification is made by cutting off some area of both ends of the BR=0.2 V-ring and the effect of cutting off (called end-cut ratio, ER=c/e) on thermal performance is also examined. The study reveals that for the end-cut V-ring, the friction factor is considerably decreased while the heat transfer rate reduces moderately with increasing ER. The end-cut V-ring yields the maximum η of 1.64 at ER=0.9, Re= 4000 with Nu/Nu₀ = 5.4. Thus, the Nu/Nu₀ of the end-cut one is about 20% higher than that of the BR=0.1 V-ring.

1. Introduction

The application of vortex generators (VGs) in a heat exchanger system is commonly known as enhancement devices for augmenting the convective heat transfer coefficient leading to the compact heat exchanger and increasing thermal performance of such a system. The outstanding characteristic of the compact heat exchanger with VGs is considerably higher heat transfer rate, leading to reduced space, weight, energy requirements and costs [1]. The series of baffle/ring/rib is often used in the design of heat exchanger systems in order to increase the degree of cooling/heating levels. Although the heat transfer rate is increased through the baffle/ring arrangement, the pressure drop of the tube is also increased to the decreased flow area effects. Therefore, ring geometry and arrangements such as ring spacing, angle of attack and height/width are among the most significant parameters in the design of heat exchanger tubes. Promvonge et al. [2] studied the effect of flow blockage ratio and pitch ratio of using inclined rings inserted into a round tube on thermal performance behaviors. They found that the ring with larger BR provided higher heat transfer and pressure loss while the one with larger PR yielded the reversing trend. Chingtuaythong et al. [3] examined the influence of relative ring-pitch and blockage ratios at a constant attack angle of the V-shaped rings on heat transfer and flow resistance characteristics. They found that the heat transfer rate was up to 5.8 times above the plain tube whereas the friction factor was up to 82 times. Jedsadaratanachai et al. [4] investigated numerically the laminar



Content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

Published under licence by IOP Publishing Ltd

1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายยิ่งยง แก้วก่อเกียรติ
วัน เดือน ปีเกิด	12 เมษายน 2522
สถานที่เกิด	จ.พิษณุโลก
ที่อยู่	51/25 หมู่ที่ 5 ต.คูคต อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12130
ประวัติการศึกษา	2544: วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร 2549: วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร
ประวัติการทำงาน	2547-2555: อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี มหานคร กรุงเทพมหานคร 2555-ปัจจุบัน: อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น กรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้